



**Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO FIN DE GRADO

TÍTULO: SOLDADURA DE EJES POR FRICCIÓN.

AUTOR: MERINO HERNÁNDEZ, DANIEL.

FECHA DE PRESENTACIÓN: 30/01/19.

APELLIDOS: MERINO HERNÁNDEZ

NOMBRE: DANIEL

TITULACIÓN: GRAU EN ENGINYERIA MECÀNICA

DIRECTOR: GONZÁLEZ ROJAS, HERNÁN ALBERTO

DEPARTAMENTO: EM (ENGINYERIA MECÀNICA).

CUALIFICACIÓN DEL TFG

TRIBUNAL

PRESIDENTE

JOAN SOLÉ ROVIRA

SECRETARIO

MARC ESCOLÀ FERNÁNDEZ

VOCAL

AGUSTÍN FORTUNY SANROMA

FECHA DE LECTURA: 06/01/19

Este proyecto tiene en cuenta aspectos medioambientales: ☐ Sí ☐ No

RESUMEN

Debido a la globalización mundial y a la elevada competencia entre empresas del mismo sector se requiere constantemente a procesos alternativos que ofrezcan los mismos resultados pero con bajo coste. Aplicado este fenómeno al sector industrial, existen componentes mecánicos que por requisitos del diseño presentan elevados mecanizados, encareciendo el coste de la pieza. A través de la soldadura por fricción pueden seccionarse dichos componentes con el objetivo de realizar menos procesos de mecanizado, siendo posteriormente unidos mediante fricción.

La soldadura por fricción se produce cuando dos materiales están enfrentados entre sí manteniendo una velocidad relativa entre ellas. Debido a una fuerza axial externa aplicada y al rozamiento generado entre las superficies, se genera calor produciendo a su vez una deformación del material debido a la combinación de dichos factores.

El objetivo de este proyecto consiste en diseñar y construir las herramientas y utillajes necesarios para establecer la soldadura por fricción rotativa entre dos piezas, acoplado todo ello a un torno convencional. Logrando de manera satisfactoria la unión entre un tubo y una placa metálica.

Tras la realización de varios prototipos de utillajes, se realizan pruebas experimentales con diferentes condiciones, siendo una de las más importantes la temperatura generada en la cara de rozamiento. Una vez las muestras son unidas, son traccionadas posteriormente para observar qué esfuerzo soporta dicha unión.

Tras analizar los resultados de manera estadística mediante el test Kolmogorov-Smirnov se observa que los resultados obtenidos se comportan siguiendo una distribución normal en un intervalo de confianza del 95%, teniendo por tanto una cierta coherencia los resultados obtenidos.

Observando más detalladamente la superficie de la zona de rozamiento entre las piezas una vez han sido traccionadas se ha observado que se genera óxido en el proceso, siendo un factor que influye perjudicialmente en las propiedades mecánicas de la unión.

Tras la realización del presente TFG se concluye que con las condiciones establecidas en los ensayos, se puede asegurar que las muestras soportarán una carga dentro de un intervalo comprendido entre [140, 208] Kg, siendo válido para aplicaciones que requieran leves solicitaciones.

Palabras clave (máximo 10):

Soldadura por fricción rotativa	Difusión de calor	Esfuerzo a tracción	Diseño de utillajes
Soldadura por fricción-agitación	Johnson Cook	Recalcado	
Soldadura por fricción lineal	Plasticidad		

ABSTRACT

Due to global globalization and the high competition between companies in the same sector, alternative processes that offer the same results but at a low cost are constantly required. Applied this phenomenon to the industrial sector, there are mechanical components that by design requirements have high machining processes thus increasing the cost of the piece. Through the friction welding, these components can be sectioned in order to perform fewer machining processes, being subsequently joined by friction.

Frictional welding occurs when two materials are facing each other a relative speed between them. Due to an applied external axial force and the friction generated between the surfaces, heat is generated, producing a deformation of the material due to the combination of said factors.

The objective of this project is to design and build the necessary tools to establish the rotary friction welding between two pieces, all coupled to a conventional lathe. Successfully achieving the connection between a tube and a metal plate.

After the realization of several tooling prototypes, experimental tests are carried out with different conditions, being the temperature generated on the friction surface one of the most important. Once the samples are joined, they are tracked later to observe what effort the union holds.

After analyzing the results in a statistical way by Kolmogorov-Smirnov test, it is observed that the results obtained behave following a normal distribution in a 95% confidence interval, having therefore a certain consistency the results obtained.

Looking closely at the surface of the friction zone between the parts once they have been traced it is observed that oxide is generated in the process, being a factor that detrimentally influences the mechanical properties of the joint.

After carrying out the present TFG it is concluded that with the conditions established in the tests, it can be ensured that the samples will bear a load within a range between [140, 208] Kg, being valid for applications that require slight solicitations.

Keywords (10 maximum):

Rotary Friction Welding (RFW)	Heat diffusion	Traction effort	Tools design
Friction Stir Welding (FSW)	Johnson Cook	Roll forging	
Linear Friction Welding (LFW)	Plasticity		

ÍNDICE

1. PREFACIO	11
1.1. MOTIVACIÓN DEL PROYECTO.	11
1.2. OBJETIVO DEL PROYECTO.	11
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	11
2. ESTADO DEL ARTE	12
2.1 LINEAR FRICTION WELDING	14
2.1.1. APLICACIONES	15
2.1.2. VENTAJAS	16
2.1.3. INCONVENIENTES	17
2.2. FRICTION STIR WELDING	17
2.2.1. APLICACIONES	18
2.2.2. HERRAMIENTAS	19
2.2.3. VENTAJAS	19
2.2.4. INCONVENIENTES	20
2.3. ROTATIONAL FRICTION WELDING	21
2.3.1. APLICACIONES	22
2.3.2. VENTAJAS	23
2.3.3. INCONVENIENTES	23
2.4. INERTIA FRICTION WELDING	24
2.4.1. APLICACIONES	25
2.4.2. VENTAJAS	26
2.4.3. INCONVENIENTES	26
3. MODELO TEÓRICO	27
3.1. ENFOQUE DEL PROBLEMA.	27
3.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	27
3.3. MODELO DE FLUJO DE CALOR APLICADO A LA SOLDADURA POR FRICCIÓN DE DOS CILINDROS.	28
3.4. MODELO DE FLUJO DE CALOR APLICADO A UNA PLACA.	31
3.5. MODELO DE LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA.	34
3.6. LEY CONSTITUTIVA DEL MATERIAL	36
4. DISEÑO DE LOS UTILAJES DE SOLDADURA	37
4.1. PRIMER MODELO.	38
4.1. SEGUNDO MODELO.	39
4.2. TERCER MODELO.	45
5. PRESUPUESTO	56
6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	59
7. CONCLUSIONES	61

AGRADECIMIENTOS	62
BIBLIOGRAFÍA	63
ANEXOS	66

SUMARIO DE FIGURAS

FIGURA 1: TABLA QUE RELACIONA LA SOLDABILIDAD ENTRE DIFERENTES MATERIALES [1]	13
FIGURA 2: PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN LINEAL [2]	14
FIGURA 3: ÁLABE Y DISCO ROTOR POR SEPARADO ANTES DE SU UNIÓN [4].....	14
FIGURA 4: PIEZA MECÁNICA DE UNA TURBINA DE GAS [5].....	15
FIGURA 5: MUESTRAS REALES DE VÍAS FÉRREAS PREVIAS A SU UNIÓN. [6]	15
FIGURA 6: VÍAS FÉRREAS UNIDAS MEDIANTE LA FRICCIÓN LINEAL ENTRE AMBAS [6]	15
FIGURA 7: DIFERENTES MATERIALES UNIDOS MEDIANTE LFW. [8]	16
FIGURA 8: POSIBLES COMBINACIONES DE GEOMETRÍAS UNIDAS MEDIANTE LFW. [7]	16
FIGURA 9: PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN (FSW). [9]	18
FIGURA 10: APLICACIÓN DE FSW A UN CAPÓ DE UN VEHÍCULO MOTOR [11].....	18
FIGURA 11: TIPOS DE HERRAMIENTAS USADAS EN LA SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN. [13].....	19
FIGURA 12: POSIBLES COMBINACIONES DE GEOMETRÍAS UNIDAS MEDIANTE FRW. [17].....	21
FIGURA 13: EJES MACIZOS UNIDOS MEDIANTE FRICCIÓN ROTATIVA. [18]	21
FIGURA 14: RELACIÓN DE LAS VARIABLES QUE AFECTAN AL PROCESO FRW CON EL TIEMPO. [19]	22
FIGURA 15: VÁSTAGO Y ÉMBOLO UNIDOS MEDIANTE FRICCIÓN ROTATIVA. [20].....	21
FIGURA 16: EJE Y TURBINA UNIDOS MEDIANTE FRICCIÓN ROTATIVA. [21].....	23
FIGURA 17: EJES MACIZOS UNIDOS MEDIANTE IFW. [18].....	24
FIGURA 18: RELACIÓN DE LAS VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO IFW CON EL TIEMPO. [24]	25
FIGURA 19: UNIÓN MEDIANTE IFW UN EJE DELANTERO DE VEHÍCULOS MOTOR DE 4 RUEDAS. [25]	25
FIGURA 20: HERRAMIENTA DE AVELLANADO CÓNICO UNIDA POR IFW. [26]	26
FIGURA 21: REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN ROTATIVA. [AUTOR]	27
FIGURA 22: REPRESENTACIÓN DEL FLUJO DE CALOR ESTABLECIDO EN EL SISTEMA. [AUTOR]	28
FIGURA 23: REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE TEMPERATURAS. [AUTOR]	30
FIGURA 24: DETALLE DEL CONJUNTO LÁMINA-BAQUELITA. [AUTOR]	31
FIGURA 25: REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL CONJUNTO LÁMINA-BAQUELITA. [AUTOR]	31
FIGURA 26: REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA BARRA SIN UNA FUERZA APLICADA. [AUTOR]	34
FIGURA 27: REPRESENTACIÓN DE LA BARRA CUANDO ES APLICADA UNA FUERZA DE VALOR F. [AUTOR]	34
FIGURA 28: REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL RESULTADO DE LA MUESTRA. [AUTOR]	35
FIGURA 29: REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL GRADIENTE DE VELOCIDAD GENERADO. [AUTOR]	36
FIGURA 30: TORNO CONVENCIONAL DONDE SE REALIZAN LOS ENSAYOS [AUTOR]	37
FIGURA 31: DOS EJES DE ALUMINIO Ø10 SOLDADOS MEDIANTE FRICCIÓN ROTATIVA [AUTOR]	37
FIGURA 32: ENSAMBLAJE 1 CAD DE LAS PIEZAS PARA LA UNIÓN EJE-PLETINA. [AUTOR]	38
FIGURA 33: UNIÓN EJE-PLETINA DE ALUMINIO. [AUTOR]	38
FIGURA 34: PIEZA AISLANTE CON RANURA. (PLANO PL_01_03).[AUTOR].....	39
FIGURA 35: ENSAMBLAJE CAD DE LAS PIEZAS PARA LA UNIÓN EJE-PLETINA. [AUTOR]	40
FIGURA 36: IMAGEN DEL PROCESO DE UNIÓN EJE-PLETINA. [AUTOR].....	40
FIGURA 37: LOCALIZACIÓN DE LA MEDIDA DEL TERMOPAR. [AUTOR]	40
FIGURA 38: TALADRO DE PEDESTAL PERFORANDO LA PIEZA PL_01_01 SUJETA A UNA MORDAZA PARA TALADRO. [AUTOR].....	41
FIGURA 39: OPERACIÓN DE ROSCADO DE LA PIEZA PL_01_01. [AUTOR]	41
FIGURA 40: MATRIZ CERRADA PREVIA A LA PERFORACIÓN.[AUTOR]	42
FIGURA 41: MATRIZ ABIERTA CON LA PIEZA PL_01_03 PERFORADA.	42
FIGURA 42: MÁQUINA DE TRACCIÓN DONDE SE REALIZARON LOS ENSAYOS A LAS MUESTRAS. [AUTOR]	42
FIGURA 43: ÚTIL DISEÑADO PARA LA TRACCIÓN DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN LOS ENSAYOS. [AUTOR]	43
FIGURA 44: TUBO DE ACERO UNIDO A UNA LÁMINA DE ACERO INOXDABLE [AUTOR]	43
FIGURA 45: RESULTADO DE LAS PROBETAS DESPUÉS DE LA TRACCIÓN. [AUTOR]	44
FIGURA 46: PIEZAS AISLANTES DEFORMADAS POR EL EFECTO TÉRMICO. [AUTOR].....	45
FIGURA 47: ENSAMBLAJE CAD DEL TERCER MODELO. [AUTOR]	45

FIGURA 48: DISEÑO ROBUSTO DEL TERCER MODELO [AUTOR]	46
FIGURA 49: LÁMINA DE BAQUELITA USADA COMO AISLANTE. [AUTOR]	46
FIGURA 50: ÚTIL SEMIRRÍGIDO DE TRACCIÓN. [AUTOR]	48
FIGURA 51: RESULTADO DE LAS MUESTRAS DESPUÉS DEL ENSAYO A TRACCIÓN. [AUTOR]	50
FIGURA 52: MICROSCOPIO SMZ800. [AUTOR]	51
FIGURA 53: MUESTRA 1036 OBSERVADA POR EL EQUIPO SMZ800.....	51
FIGURA 54: MUESTRA 1039 OBSERVADA POR EL EQUIPO SMZ800.....	52
FIGURA 55: MICROSCOPIO ÓPTICO MODELO ECLIPSE LV100. [AUTOR]	52
FIGURA 56: MUESTRA 1036 VISTA CON LUZ POLARIZADA.....	53
FIGURA 57: MUESTRA 1039 VISTA CON LUZ POLARIZADA.....	53
FIGURA 58: COMPORTAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN FUNCIÓN DEL OXÍGENO EN LA SOLDADURA. [28]	54
FIGURA 59: COMPORTAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN FUNCIÓN DEL OXÍGENO EN LA SOLDADURA. [28]	55
FIGURA 60: GRÁFICO SECTORIAL DEL PRESUPUESTO. [AUTOR]	57
FIGURA 61: GRÁFICO SECTORIAL DEL PRESUPUESTO REAL. [AUTOR]	58
FIGURA 62: RESULTADO DEL ANÁLISIS KOLMOGOROV-SMIRNOV. [G-NUMERICS]	59
FIGURA 63: RESULTADO DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO.	59
FIGURA 64: GRÁFICA DE LA DISTRIBUCIÓN NORMAL DE LAS MUESTRAS.....	60

SUMARIO DE TABLAS

TABLA 1: CONDICIONES ESTABLECIDAS PARA EL TERCER ENSAYO.[AUTOR]	43
TABLA 2: CONDICIONES DE LOS ENSAYOS Y SU RESISTENCIA A LA TRACCIÓN. [AUTOR]	44
TABLA 3: RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS REALIZADOS CON EL TERCER DISEÑO. [AUTOR]...	47
TABLA 4: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS CON LA NUEVA VERSIÓN DEL ÚTIL DE TRACCIÓN. [AUTOR]	48
TABLA 5: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS CON LA NUEVA VERSIÓN DEL ÚTIL DE TRACCIÓN. [AUTOR]	49
TABLA 6: DESGLOSE DEL PRESUPUESTO TOTAL DEL PROCESO. [AUTOR]	56
TABLA 7: COSTE REAL ASUMIDO POR EL ALUMNO EN LA REALIZACIÓN DEL PROYECTO. [AUTOR]	57
TABLA 8: MUESTRAS ANALIZADAS PARA EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO. [AUTOR]	59

GLOSARIO

ΔU : Variación de energía interna (J)
 ΔL = Variación de la longitud del material (m)
 A = Sección durante la deformación del material (m^2)
 ΔA = Variación de área (m^2)
 A_0 = Sección inicial del material (m^2)
 Δx : Segmento infinitesimal (m)
 C_p : Calor específico a presión constante (J/Kg·K)
 D : Diámetro de la barra (m)
 dL = Cambio instantáneo de longitud.
 \varnothing_f = Diámetro final de la barra (m)
 \varnothing_i = Diámetro inicial de la barra (m)
 $d\varepsilon$ = Deformación infinitesimal.
 e = Espesor de recalcado (mm)
 ε = Deformación del material.
 F : Fuerza aplicada (N)
 h_L : Coeficiente de convección natural de aire para un régimen laminar ($W/m^2 \cdot K$)
 h_T : Coeficiente de convección natural de aire para un régimen turbulento ($W/m^2 \cdot K$)
 k : Conductividad térmica ($W/m \cdot K$)
 k_A : Conductividad térmica del acero S235 a 400°C ($W/m \cdot K$)
 k_B : Conductividad térmica de la baquelita a 400°C ($W/m \cdot K$)
 L : Longitud del material (m)
 L_0 : Longitud inicial del material. (m)
 ρ : Densidad del material (Kg/m^3)
 q : Calor por unidad de área (J/m^2)
 Q_e : Calor de entrada (J)
 Q_s : Calor de salida (J)
 S : Área de una sección (m^2)
 S_b : Superficie barra (m^2)
 t : Tiempo (s)
 T_{amb} : Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)
 TAS = Tolerancia Agujero Superior (μm)
 TAI = Tolerancia Agujero Inferior (μm)
 TES = Tolerancia Eje Superior (μm)
 TEI = Tolerancia Eje Inferior (μm)
 T =Temperatura del material ($^{\circ}C$)
 T_B = Temperatura en la baquelita ($^{\circ}C$)
 T_f = Temperatura de fusión del material ($^{\circ}C$)
 T_m : Temperatura medida ($^{\circ}C$)
 T_p : Temperatura promedio ($^{\circ}C$)
 T_r : Temperatura en la cara de roce ($^{\circ}C$)
 V : Volumen del material (m^3)
 ω : Velocidad angular (rad/s)

1. PREFACIO

1.1. Motivación del proyecto.

La motivación de este proyecto surge por la propuesta de investigación sobre un método alternativo de soldadura, poco conocido y actualmente en fase de investigación.

El trabajar en un campo donde prácticamente no existe información sobre este, dificulta notablemente la elaboración del estudio, dado que hay situaciones en las que no hay un guion preestablecido sobre cómo actuar y se requieren realizar ensayos-errores para comprobar cuál es la línea de investigación correcta.

La posibilidad de estudiar el comportamiento de este método de manera práctica aumenta la motivación por parte del alumno para seguir trabajando diariamente, ya que puede observar el comportamiento del estudio teórico realizado y a su vez, los objetivos planteados del mismo.

1.2. Objetivo del proyecto.

El objetivo principal de este proyecto consiste en diseñar y construir las herramientas y utillajes necesarios para establecer la soldadura por fricción rotativa entre un tubo y una placa en un torno convencional.

1.3. Objetivos específicos.

Los objetivos específicos de este proyecto son los siguientes:

- Diseñar y fabricar los utillajes necesarios para establecer la unión entre una placa y un tubo con su respectivo sistema de guiado, aislamiento, sujeción y avance.
- Producir la soldadura por fricción rotativa entre dos piezas.
- Estudiar el comportamiento de un tubo y una pletina, de pared fina conocida, sometidos a una fuerza axial externa para llevar a cabo la soldadura por fricción rotativa entre ambas.
- Controlar y medir la temperatura que se genera en la zona de unión de ambos materiales.
- Realizar un modelo donde aparezcan los parámetros necesarios para realizar la soldadura por fricción rotativa entre dos ejes de diámetro y material conocido.
- Comprobar mediante ensayos de tracción, el esfuerzo que soportan las muestras una vez unidas por fricción.

2. ESTADO DEL ARTE

La globalización mundial hace que actualmente exista una elevada competencia entre empresas del mismo sector, produciendo una guerra de precios en algunos casos. Es por ello que dichas empresas estén constantemente estudiando alternativas con el objetivo de reducir costes en sus procesos sin perder calidad en la producción, requiriendo en algunas ocasiones a procesos de fabricación alternativos.

Haciendo referencia a la soldadura, existen formas alternativas, aún en vías de desarrollo e investigación, que permiten unir materiales sin necesidad de aleaciones ni adiciones de terceros. Estos métodos alternativos comparten un eje común y es el principio que actúa en ellos para lograr la unión de las piezas.

Este principio consiste en la coalescencia de dos piezas que están bajo el efecto de una fuerza axial de compresión y que a su vez se establece un movimiento relativo entre ambas. De esta manera, es generado un calor en la superficie de contacto y una deformación plástica de la misma, produciendo la unión entre ambas piezas.

Estos procesos alternativos suponen un avance para la industria debido a la ausencia de terceros componentes (electrodos, argón, oxígeno...), a su simplicidad de ejecución y al bajo coste energético que se requiere para realizar este proceso, y hacen de la soldadura por fricción un proceso barato e innovador, aplicable a la industria actual.

Una de las características que aporta este proceso es la posibilidad de unir materiales disímiles, que no se pueden unir con los procesos de soldadura tradicionales y generan por tanto, una gran combinación de materiales soldables, como se puede apreciar en la siguiente figura:

	Zirconium Alloys	Valve Materials (Automotive)	Vanadium	Uranium	Tungsten Carbide Cemented	Tungsten	Titanium Alloys	Titanium	Tantalum	Steel – Tool	Steel – Stainless	Steel – Sintered	Steel – Maraging	Steel – Free Machining	Steel – Carbon	Steel – Alloys	Silver Alloys	Silver	Niobium Alloys	Niobium	Nimonic	Nickel Alloys	Nickel	Monel	Molybdenum	Magnesium Alloys	Magnesium	Lead	Iron Sintered	Copper Nickel	Copper	Columbium	Cobalt	Ceramic	Cast Iron	Carbides Cemented	Bronze	Brass	Aluminum Alloys		
Aluminum																																									
Aluminum Alloys																																									
Brass																																									
Bronze																																									
Carbides Cemented																																									
Cast Iron																																									
Ceramic																																									
Cobalt																																									
Columbium																																									
Copper																																									
Copper Nickel																																									
Iron Sintered																																									
Lead																																									
Magnesium																																									
Magnesium Alloys																																									
Molybdenum																																									
Monel																																									
Nickel																																									
Nickel Alloys																																									
Nimonic																																									
Niobium																																									
Niobium Alloys																																									
Silver																																									
Silver Alloys																																									
Steel – Alloys																																									
Steel – Carbon																																									
Steel – Free Machining																																									
Steel – Maraging																																									
Steel – Sintered																																									
Steel – Stainless																																									
Steel – Tool																																									
Tantalum																																									
Thorium													</																												

Figura 1: Tabla que relaciona la soldabilidad entre diferentes materiales [1]

A pesar de estos beneficios, el problema de este sistema erradica en la complejidad para ejecutar el mismo. Las variables que intervienen en el proceso son las que determinarán la calidad de la soldadura. El tiempo que deben estar en contacto las piezas, la velocidad a la que deben girar o moverse relativamente, la fuerza máxima aplicable... son algunas de las variables que se estudiarán y definirán a lo largo del proyecto para controlar la unión de las piezas.

Actualmente se distinguen cuatro tipos de soldadura por fricción:

- Soldadura por fricción lineal (*LFW, Linear Friction Welding*).
- Soldadura por fricción-agitación (*FSW, Friction Stir Welding*),
- Soldadura por fricción rotativa mediante un volante de inercia (*IFW, Inertia Friction Welding*)
- Soldadura por fricción rotativa (*RFW, Rotational Friction Welding*).

Este último tipo de soldadura es el proceso menos estudiado de los mencionados anteriormente, por lo que es un método parcialmente desconocido y del cual se dispone menos información. Este documento se centrará en el estudio de este último, ofreciendo un ensayo práctico basado en un estudio teórico, dando por resultado unas conclusiones basadas en un estudio estadístico, para poder establecer la soldadura por fricción rotativa de manera correcta.

A continuación se detalla de manera más precisa el comportamiento de los procesos de soldadura por fricción citados anteriormente:

2.1 Linear Friction Welding

[2] Como su nombre indica, la soldadura por fricción lineal (*Linear Friction Welding*, en inglés), consiste en generar un movimiento relativo lineal entre dos materiales, aplicándoles axialmente una fuerza axial de compresión. Este proceso se usa para soldar metales que poseen elevadas propiedades mecánicas en altas temperaturas y baja conductividad térmica. De esta manera, se permite que el calor generado quede retenido en la cara de roce, facilitando la plasticidad y a su vez, la unión.

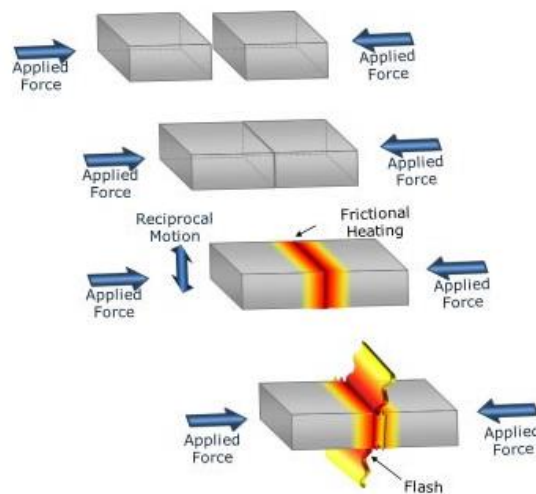


Figura 2: Proceso de soldadura por fricción lineal [2]

2.1.1. Aplicaciones

[3] Este proceso de soldadura es aplicable a varios tipos de industria, como por ejemplo en el sector de la automoción, aeroespacial, ferroviario, transporte de gases...



Figura 3: Álabe y disco rotor por separado antes de su unión [4]



Figura 4: Imagen real del componente mecánico blisk. [5]

En esta primera imagen se puede apreciar un componente mecánico llamado originalmente *blisk*, usado básicamente en el sector aeroespacial cuyo nombre proviene de la unión de sus palabras y componentes *blade* y *disk*. Dichos componentes son unidos mediante la fricción de los mismos, produciendo así, el acabado final de la pieza. De esta manera, con el uso de la unión por fricción, se evita requerir a un mecanizado CNC, debido a su elevado coste de producción y complejidad.



Figura 5: Vías férreas previas a su unión. [6]



Figura 6: Vías férreas unidas mediante la fricción lineal entre ambas [6]

En las imágenes mostradas anteriormente se aprecia la unión de dos raíles de vías férreas unidos mediante la soldadura por fricción lineal. De la misma manera que si se hubiera realizado la unión por métodos de soldadura tradicional, sería necesario un posterior proceso de acabado para garantizar la rugosidad en la cara de roce con las ruedas del tren. De esta modo, se reduce el tiempo que se requiere para unir dichas

vías, así como se ve reducido notablemente el coste del proceso.

2.1.2. Ventajas

Las ventajas que ofrece este proceso respecto los tradicionales son las propiedades mecánicas obtenidas en las piezas unidas. Estas, son más elevadas debido a que no se produce la fusión de material y por ello, no se produce una alteración de la composición del material de la región unida.

Además, la unión que se establece entre las piezas es completamente homogénea y ofrece la posibilidad de unir diferentes materiales entre sí como se puede apreciar en la siguiente imagen:



Figura 7: Diferentes materiales unidos mediante LFW. [7]

Otro de los beneficios de este proceso es la sencilla automatización del mismo, obteniendo elevadas series de producción y hasta con un ahorro energético de un 20% respecto los procesos convencionales. Además, no es necesaria una preparación previa de la superficie de contacto, puesto que este proceso genera fricción, a más irregular la superficie, mayor rozamiento se establece. Debido a la característica comentada anteriormente sobre el ahorro energético, este proceso es considerado sostenible con el medio ambiente, debido que no se requieren elementos consumibles ni el aporte de material.

En la figura que se muestra a continuación se ven reflejadas las geometrías que pueden ser unidas mediante este proceso, ofreciendo varias combinaciones posibles.



Figura 8: Posibles combinaciones de geometrías unidas mediante LFW. [8]

2.1.3. Inconvenientes

[9] Debido a que es un sistema en auge, no existe actualmente una competencia entre empresas de alto nivel para poder establecer una guerra de precios y abaratar el coste de la maquinaria necesaria. Por ello, hacen de este sistema un método muy poco accesible si se requiere un número de piezas reducido.

Por otra parte, se establece una limitación física del tamaño de las piezas a unir. Dependiendo del volumen de la maquinaria que se dispone, dependerá el volumen máximo de la pieza a unir, por lo que, con una baja inversión en maquinaria, no es posible la unión de piezas de alto volumen.

2.2. Friction Stir Welding

[10] La soldadura por fricción por agitación (*Friction Stir Welding, en inglés*), es un tipo de soldadura que utiliza una herramienta no consumible para establecer la soldadura entre dos placas metálicas en contacto. La herramienta, que es diseñada para soportar elevadas temperaturas, penetra girando a altas revoluciones en dichas placas produciendo calor debido al rozamiento entre ellas. Mediante un avance lento va deformando plásticamente el material sin llegar a su punto de fusión y provocando la unión entre dichas placas. Una de las características notables de este proceso es su homogeneidad en la soldadura y la posibilidad de unión de piezas de elevada longitud sin la necesidad de establecer tramos de soldadura. Cabe destacar que dichas placas deben ser fijadas y aseguradas previamente a dicho proceso, ya que podrían causar lesiones en su defecto.

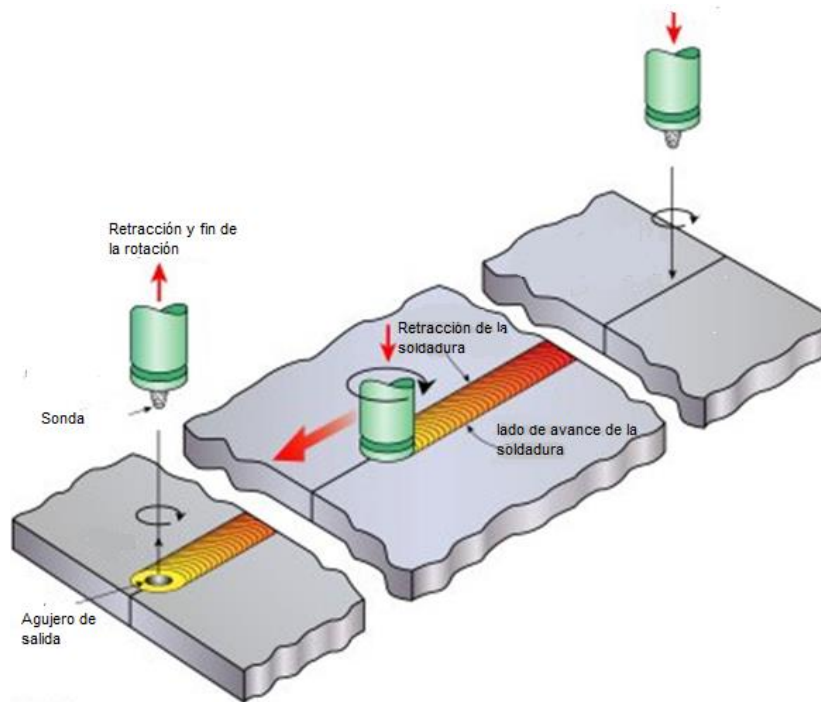


Figura 9: Proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW). [10]

2.2.1. Aplicaciones

Este proceso es usado principalmente para la unión de aluminios y sus aleaciones, aplicándose a componentes que requieren una elevada resistencia a la soldadura. De esta manera, son unidos con mayor facilidad y sin necesidad de aporte de material, además de un consumo energético muy bajo. Dichos componentes son usados en el sector de la ingeniería naval, automoción, ferroviaria e incluso en la aeroespacial.

Como se puede observar en la siguiente imagen, se aplica este método de unión para la elaboración de la estructura del capó de un vehículo motor. El proceso es realizado por un robot de manera automatizada.

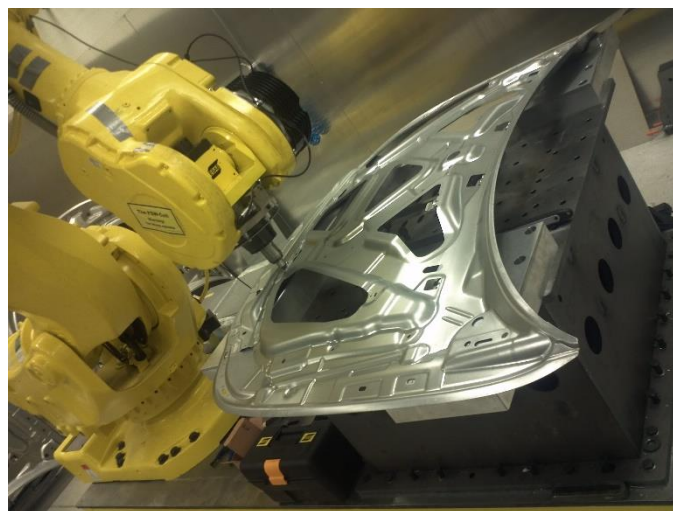


Figura 10: Aplicación de FSW a un capó de un vehículo motor [11]

2.2.2. Herramientas

La calidad de la soldadura producida por este método depende directamente de la herramienta que se utilice para elaborar el proceso. De estas, dependerán el calor generado y la disipación del mismo producido por el rozamiento entre la herramienta y las piezas.

Los materiales usados para estas herramientas deben presentar altas prestaciones de dureza en altas temperaturas durante todo el proceso de soldadura debido a las elevadas tensiones generadas. Los dos materiales más usados en este proceso son el tungsteno y el acero. El primero de ellos es caracterizado por su elevada dureza en altas temperaturas, siendo usado para la unión de aceros y sus aleaciones. En cambio, la herramienta de acero es usada para la unión de piezas metálicas de aluminio y sus aleaciones, debido al bajo coste de la herramienta. A diferencia del tungsteno, la herramienta de acero presenta un desgaste mayor en sus filamentos cuando se realizan el mismo número de operaciones a iguales condiciones.

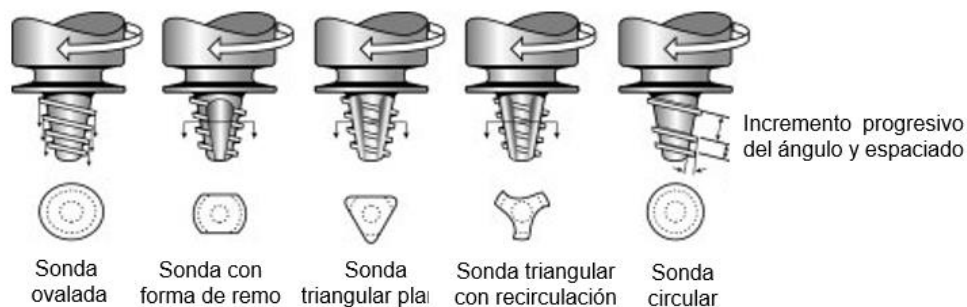


Figura 11: Tipos de Herramientas usadas en la soldadura por fricción-agitación. [13]

En la imagen anterior se muestran las geometrías de las herramientas más usadas en la soldadura por fricción-agitación. En todas ellas existe una geometría helicoidal cuya función es asegurar que el material deformado plásticamente se dirija hacia la zona inferior de la pieza. Algunas de estas herramientas disponen de secciones no circulares, con la función de reducir el área y material de la herramienta, con el objetivo de facilitar la circulación del material deformado plásticamente.

2.2.3. Ventajas

El método más utilizado actualmente para unir piezas de aluminio es la soldadura por arco. Pese a ello, este método presenta varios inconvenientes que afectan a la estructura del material, ya se producen grietas y porosidades durante la soldadura de ellas. Debido a que en la soldadura por fricción-agitación no se produce la fusión del material base, se elimina la posibilidad de aparición de grietas en la solidificación del material. Por otra parte, este método no provoca dichas porosidades provocadas por la

soldadura por arco eléctrico.

Existen actualmente máquinas que provocan la soldadura en ambas caras de las placas, reduciendo por ello, el tiempo de soldadura y el coste de ella. Además, es un proceso que permite la unión entre materiales disímiles que no pueden ser unidos por los métodos convencionales, aunque en su amplio rango de uso, el material más usado es el aluminio.

Como se ha comentado en el apartado anterior, este proceso también es respetuoso con el medio ambiente, debido a que no se producen gases tóxicos ni nocivos a la atmósfera, además de no usar consumibles.

Por todas estas características, es un método que suple tanto las ventajas como inconvenientes de la soldadura de aluminio por soldadura por arco eléctrico, usada comúnmente para la unión de los materiales tratados en este trabajo.

2.2.4. Inconvenientes

[15] Los inconvenientes que presenta este método de soldadura por fricción son varios. Entre ellos, la poca versatilidad que ofrece el proceso para unir piezas, debido a que únicamente pueden unirse láminas. Por otra parte, si se requiere producir piezas soldadas por fricción-agitación en serie, el coste inicial es muy elevado debido a que el precio de la máquina ronda los 140.000 dólares americanos. Respecto a los valores de fuerza que se quieren aplicar son muy elevados, produciendo un coste excesivo de potencia y a su vez, de energía. Por último, respecto al tiempo de ejecución de este proceso, suele ser más lento comparado con el usado tradicionalmente, por arco eléctrico.

2.3. Rotational Friction Welding

[16] La soldadura por fricción rotativa (Rotational Friction Welding, en inglés) otro tipo de proceso de unión de materiales que no incluye una fuente de energía adicional, ya sea arco eléctrico, láser o llama de gas. De la misma manera que en los otros procesos por fricción, no se produce la fusión de los materiales, únicamente su plasticidad, produciendo uniones incluso más resistentes que las realizadas por fusión.

Este tipo de soldadura se emplea para la unión de dos piezas, una de ellas mínimo, cilíndrica. Puede aplicarse para la unión entre dos ejes macizos, dos tubos, ambos anteriores combinados, o incluso, uno de ellos unido a una pieza plana.

A continuación, se muestran gráficamente las posibles combinaciones:



Figura 12: Posibles combinaciones de geometrías unidas mediante FRW. [17]

En la siguiente imagen se muestra una reproducción de la unión por fricción rotativa entre dos ejes cuando se les aplica una determinada carga axial. Puede apreciarse que se generan altas temperaturas en la cara de roce producida por la fricción de las piezas y que, debido a las cargas axiales y la deformación plástica de los materiales, se genera un recalco de material, obteniendo a su vez, la unión entre materiales.

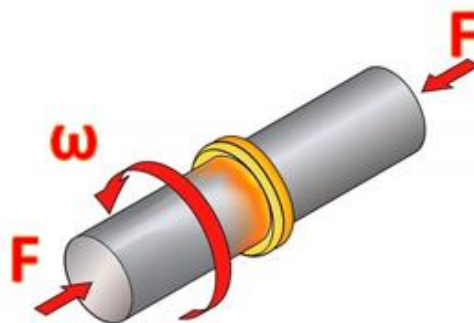


Figura 13: Ejes macizos unidos mediante fricción rotativa. [18]

Las variables que intervienen en este proceso son la velocidad de giro, la fuerza de fricción y la fuerza de forjado. En la siguiente imagen se ven reflejados todos ellos relacionados entre sí.

Dicho gráfico es válido para barras sólidas de hasta 250 milímetros de diámetro. En la siguiente imagen se puede apreciar un gráfico donde se muestran las condiciones que definen el proceso de soldadura por fricción en función del tiempo.

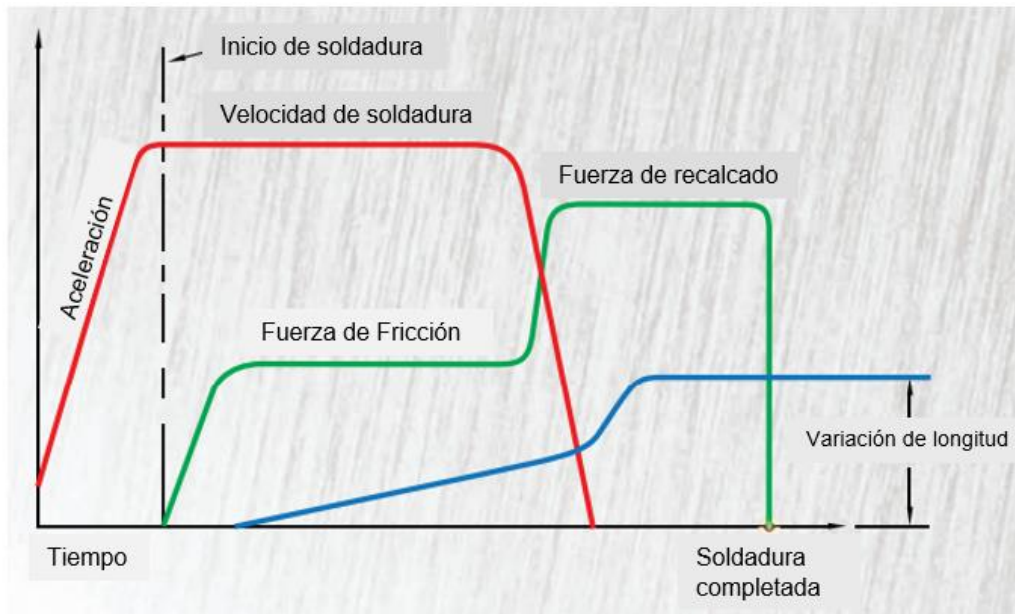


Figura 14: Relación de las variables que afectan al proceso FRW con el tiempo. [19]

Se puede apreciar que aparecen dos tipos de fuerzas distintas. La primera de ellas se produce cuando las dos caras de ambos materiales están en contacto y generando calor en la superficie debido a una velocidad relativa entre ellas. Tras una fase en que la fuerza se mantiene constante, y para generar una mejor unión, se genera una segunda fuerza, de mayor intensidad. Esta última es conocida como la fuerza de recalado, que es directamente proporcional con la contracción del material. A mayor fuerza de recalado, mayor deformación del material.

2.3.1. Aplicaciones

Este proceso es aplicable a varios campos de la ingeniería de automoción y aeronáutica. En el primero de ellos, es comúnmente usado para la unión de vástago del pistón junto a su émbolo (Ver Figura 15). Además, es usado en ocasiones para la unión de ejes de camión, ejes de remolques, cilindros hidráulicos... Por otra parte, respecto al sector aeronáutico, este método se emplea para la unión de ejes y turbinas. (Ver Figura 16):



Figura 15: Vástago y émbolo unidos mediante fricción rotativa. [20]



Figura 16: Eje y turbina unidos mediante fricción rotativa. [21]

2.3.2. Ventajas

Debido a que en este método toda la superficie de la pieza cilíndrica está en contacto con la otra pieza a unir, se crea una unión de carácter resistente y de alta calidad. Otra de las ventajas de este proceso es que no necesita una previa mecanización de la zona de contacto, puesto que dichas piezas pueden unirse directamente después del corte. Como ha sido comentado anteriormente, este proceso es, desde el punto de vista energético, más sostenible que los usados tradicionalmente debido a que no utiliza consumibles y más versátil, debido a la gran combinación de componentes que pueden unirse. (Ver Figura 1) Esto, significa una gran característica para los ingenieros de producto, ya que pueden diseñar partes bimetálicas en algunos componentes para aumentar las prestaciones de sus productos.

Si no se requiere generar piezas en serie, existe la posibilidad de reproducir este proceso con un torno, pero existe la posibilidad de la automatización de este. Con una máquina de soldadura por fricción, un robot y su correcta programación, serían capaces de generar elevados lotes de piezas de una manera autónoma, reduciendo así, los errores de factor humano.

2.3.3. Inconvenientes

[22] Como inconvenientes de este proceso se encuentran la poca versatilidad de las geometrías a unir, debido a que únicamente se pueden unir geometrías cilíndricas entre sí o con geometrías de superficie plana. Además, si se requiere para uso industrial para elaborar grandes lotes de piezas, se requiere una gran inversión para poder afrontar el coste de la máquina, que supera los 140.000€.

La problemática de este proceso es establecer correctamente los valores de los parámetros que influyen en la unión de las piezas comentados en el apartado anterior

para lograr una soldadura de calidad y no fundir los materiales. Debido a la complejidad del mismo, se puede realizar de manera manual en un torno y, a partir de varios ensayos obtener un rango de condiciones para lograr una unión óptima.

[23] Otra característica perjudicial que afecta a este proceso es el rango de unión que permite establecer. Máquinas de la empresa KUKA, puntera en este sector, ofrecen uniones para piezas cilíndricas de hasta 200 milímetros de diámetro, limitando por tanto las piezas a unir mediante este proceso.

2.4. Inertia Friction Welding

Este método de soldadura es un complementario al comentado anteriormente. Estos difieren en que este último utiliza un volante para almacenar la energía necesaria para establecer la soldadura.

En la siguiente imagen puede apreciarse este proceso, dónde dos barras cilíndricas se muestran en proceso de unión bajo dos fuerzas de compresión axiales aplicadas. Una de ellas, aplicada mediante el volante de inercia.

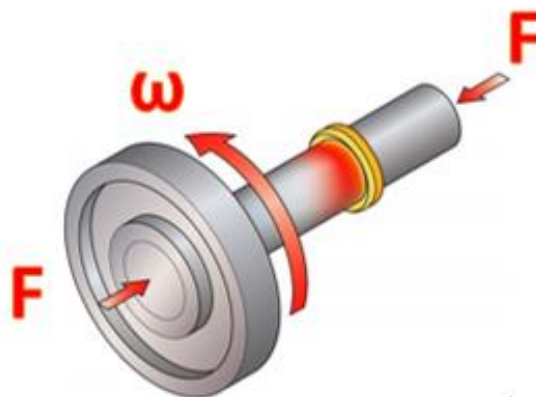


Figura 17: Ejes macizos unidos mediante IFW. [18]

A diferencia del proceso anterior, la soldadura por fricción rotativa mediante volante de inercia no requiere una fuerza de recalcado, sino que, aplica una presión constante a lo largo de todo el proceso.

En la siguiente imagen puede apreciarse el comportamiento de las variables que influyen en el proceso, siendo estas, las mismas que se han comentado en el apartado anterior.

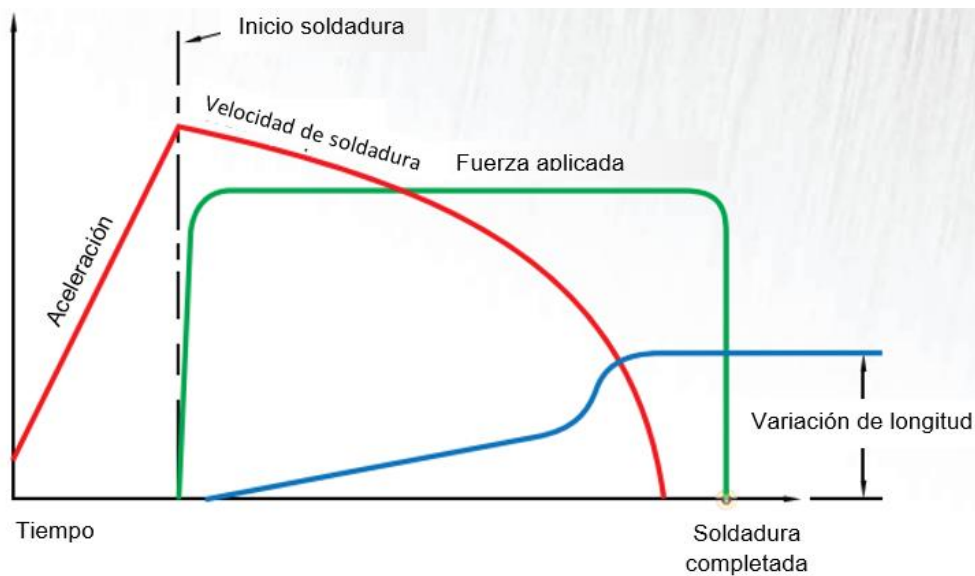


Figura 18: Relación de las variables que intervienen en el proceso IFW con el tiempo. [24]

Además de la fuerza, la otra variable que difiere del proceso anterior es la velocidad. Al disponer de un volante de inercia, como su propio nombre indica, dispone de una inercia para ser frenado, por lo que la curva comportamiento de dicha variable dispone de una pendiente pronunciada como en el proceso anterior, sino que, se comporta como una especie de parábola.

2.4.1. Aplicaciones

En relación a los campos de aplicación de este método son varios. Entre ellos, la automoción.

En la imagen inferior puede apreciarse la unión del eje de dirección delantero de vehículos motor de cuatro ruedas por fricción mediante volante de inercia.

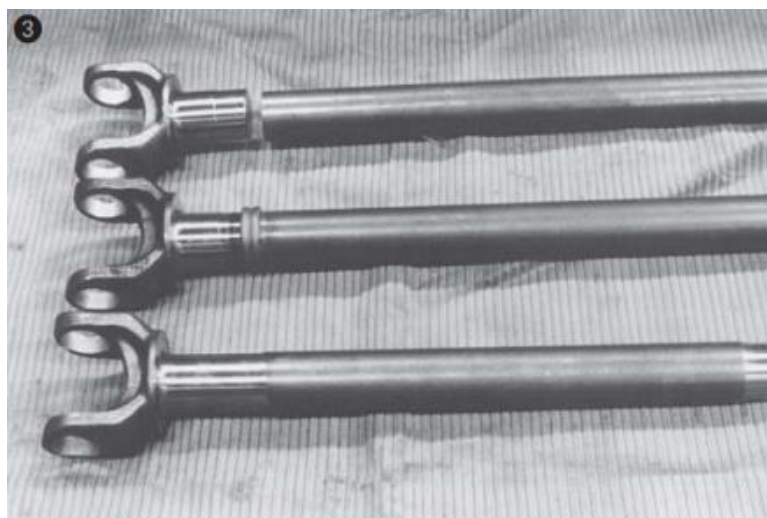


Figura 19: Unión mediante IFW un eje delantero de vehículos motor de 4 ruedas. [25]

Aunque también puede aplicarse este método para la elaboración de algunas herramientas de corte. En la siguiente imagen se puede observar cómo se une un avellanador, donde existen dos tipos de aceros diferentes. El vástago, fabricado con un acero blando es unido al cono, que está fabricado con un acero rápido.



Figura 20: Herramienta de avellanado cónico unida por IFW. [26]

2.4.2. Ventajas

[27] A diferencia al proceso comentado anteriormente, este último presenta una serie de ventajas añadidas respecto al anterior.

Una de ellas es la concentración del calor en una zona muy estrecha. Sería un beneficio si se requiere concentrar toda la energía en un punto específico debido a exigencias del diseño.

Aunque existe el ya comentado volante de inercia, no se requiere un freno para frenar su movimiento giratorio debido a que es la propia inercia del volante y el rozamiento entre las piezas los que hacen que este volante frene su movimiento.

Finalmente, en este método pueden llegarse a alcanzar fuerzas que no pueden lograrse con los métodos alcanzados anteriormente. En este método se han llegado a alcanzar fuerzas de hasta 2250 toneladas de fuerza.

2.4.3. Inconvenientes

En relación a los inconvenientes que presenta este método de unión son los ya comentados en el apartado anterior. Tanto la poca versatilidad a la hora de unir geometrías, el alto coste de la maquinaria necesaria si se requiere un proceso industrial como la selección de los parámetros a la hora de establecer la soldadura dificultan el auge de este proceso.

3. MODELO TEÓRICO

3.1. Enfoque del problema.

Debido a que se requiere la realización de un estudio práctico, este debe estar basado en un marco teórico orientado a la realización de los ensayos. Es por ello, que se deben conocer las variables que intervienen en el proceso para poder ajustar el estudio al máximo y predecir los comportamientos de los elementos.

Debido a que se considera que la temperatura es una de las variables más importantes que afectan al proceso debido que a mayor temperatura, mayor energía generada debido a la agitación de los átomos que componen el material y por tanto mayor facilidad para lograr la unión, se desea conocer la temperatura que existe en la cara de roce entre dos elementos.

Al existir rozamiento debido a una velocidad relativa entre ellas, dificulta la posibilidad de medir la temperatura que se genera en dicha zona, por lo que es necesario diseñar un modelo de difusión de calor para predecir dicha temperatura en la zona de contacto en función de la temperatura medida en un punto de la pieza que no presenta velocidad y además, está aislada térmicamente.

3.2. Definición del problema

Como se puede apreciar en la Figura 21, se muestra el esquema de dos barras cilíndricas esbeltas en contacto. Mientras que una de ellas está fija, la otra gira a una determinada velocidad, produciendo un rozamiento entre ellas y por consiguiente, generando calor. Este calor, junto con una fuerza externa F , produce el recalcado entre ambas piezas, logrando finalmente su unión.

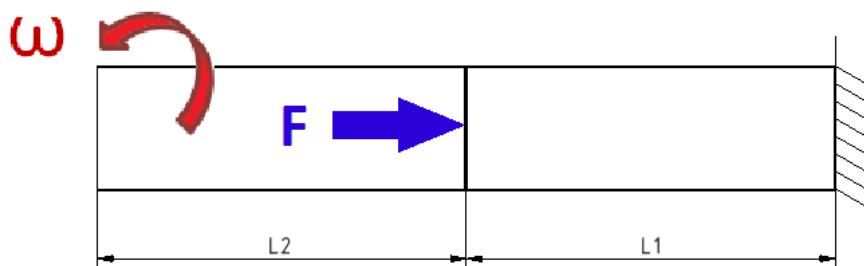


Figura 21: Representación esquemática del proceso de soldadura por fricción rotativa. [Autor]

3.3. Modelo de flujo de calor aplicado a la soldadura por fricción de dos cilindros.

Para diseñar este modelo se deberá deducir la ecuación general del flujo de calor para un problema de soldadura por fricción para barras cilíndricas esbeltas.

Las hipótesis que se considerarán serán las siguientes:

- Las barras esbeltas disponen de una sección constante.
- El flujo de calor se produce de manera unidimensional y en régimen transitorio.
- La cara opuesta del material que no presenta velocidad angular está completamente aislada, siendo en ella donde será medido el valor de temperatura.

Aplicando el principio de la conservación de la energía sobre un segmento infinitesimal de la barra (Δx), en la Figura 22 se refleja el flujo de calor que interviene en dicho sistema.

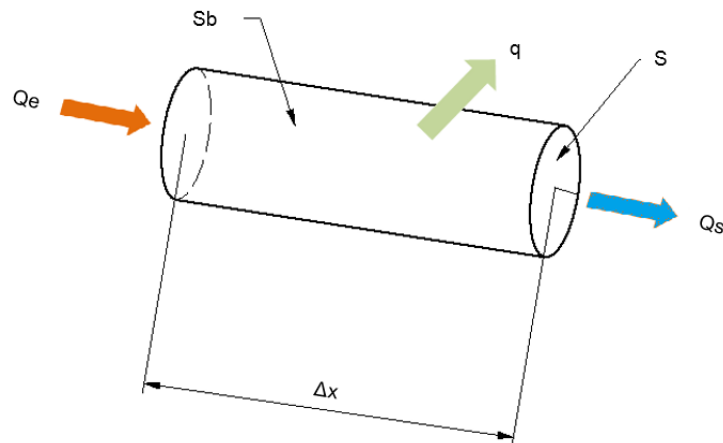


Figura 22: Representación del flujo de calor establecido en el sistema. [Autor]

Siendo Q_e y Q_s energía en forma de calor que se propaga por conducción, mientras q , energía forma de calor por unidad de superficie liberada por el sistema que se propaga por convección.

Siendo la variación de la energía interna el resultado de la diferencia entre el flujo de calor de entrada y el de salida, la expresión del balance de energía resulta de la manera siguiente:

$$\frac{dQ}{dt} = Q_e - (Q_s + q \cdot S_b) \quad [1]$$

Siendo $\frac{dQ}{dt}$ la variación de energía o calor que se produce en el sistema, y S_b el área de la barra.

Desarrollando Q_s mediante una serie de Taylor se obtiene:

$$Q_s(x + \Delta x) = Q_e(x) + \frac{\Delta x}{1!} \frac{dQ_e(x)}{dx} + \frac{\Delta x^2}{2!} \frac{d^2Q_e(x)}{dx^2} + \frac{\Delta x^3}{3!} \frac{d^3Q_e(x)}{dx^3} + \dots \quad [2]$$

Asumiendo que el valor de Δx es infinitamente pequeño, se obtiene una aproximación siempre y cuando el valor Δx tienda a cero.

$$Q_s(x + \Delta x) = Q_e(x) + \Delta x \frac{dQ_e(x)}{dx} \quad [3]$$

Reemplazando [3] en [1] se obtiene la expresión del balance de calor:

$$\frac{dQ}{dt} = -\Delta x \frac{dQ}{dx} - q \cdot S_b \quad [4]$$

Por otra parte, si no se modifica el estado de la materia que compone un sistema, la variación de la energía interne sensible o calor sensible se puede calcular mediante:

$$\frac{dQ}{dt} = \rho \cdot C_p \cdot V \cdot \frac{dT}{dt} \quad [5]$$

La ley de Fourier para un problema de difusión de calor de manera unidimensional, se expresa tal que:

$$Q(x) = -k \cdot S \cdot \frac{dT}{dx} \quad [6]$$

Reemplazando [6] y [5] en [4] y asumiendo que la sección de la barra es circular de diámetro D , se obtiene:

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} = k \frac{d^2T}{dx^2} - \frac{4q}{D} \quad [7]$$

El calor por unidad de superficie que se propaga al exterior a través del cilindro debido a la convección se define como:

$$q = h (T - T_{amb}) \quad [8]$$

Reemplazando [8] en [7] se obtiene el modelo de flujo de calor para el problema de soldadura por fricción de dos ejes cilíndricos esbeltos de sección constante:

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} = k \frac{d^2T}{dx^2} - \frac{4h}{D} (T - T_{amb}) \quad [9]$$

Para conocer la distribución de temperatura en las barras soldadas, es necesario conocer el calor generado por el rozamiento o bien, conocer la temperatura en la zona de contacto entre las barras. La zona de contacto está formada por la unión de una barra fija y una barra que gira a altas velocidades. La única manera de poder conocer la temperatura directamente que se genera en dicha zona es mediante un aparato de medida óptica, adoptando así una serie de errores de medición.

Por ello, dicha temperatura se calculará de manera indirecta, midiendo la temperatura en el punto T_m (Ver Figura 23), el cual estará completamente aislado térmicamente y a su vez, en contacto con un termopar tipo K.

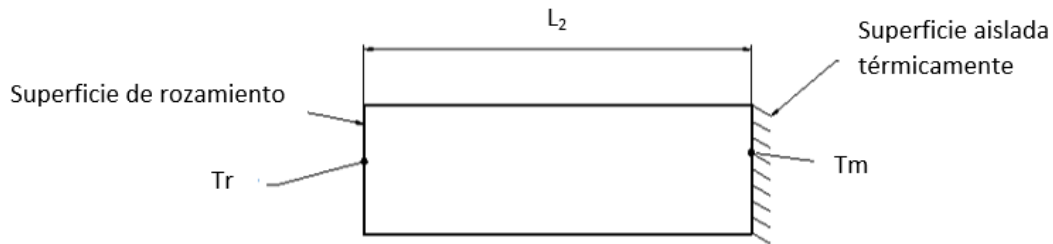


Figura 23: Representación esquemática del sistema de medición de temperaturas. [Autor]

Conocida la temperatura T_m y solucionando el modelo de flujo de calor [9], se obtiene la temperatura T_r . La solución de este problema se obtiene mediante iteraciones ya que se debe introducir una temperatura promedio en la superficie del cilindro con la que poder estimar el coeficiente de convección h .

Una vez ha comenzado la fricción entre ambas piezas, se requiere de un tiempo hasta alcanzar la temperatura a la que se produce el recalcado. De la misma manera, el sistema tiene una propia inercia térmica, ya que la temperatura T_r está asociada a un valor límite que es la temperatura de recalcado. Para obtener este valor límite se resuelve el problema estacionario asociado a [9]:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{4h}{\pi D}(T - T_{amb}) = 0 \quad [10]$$

Con las condiciones de contorno de superficie aislada, se conoce que en $x=0$ no hay flujo de calor y la temperatura en $x=L_1$ es conocida ya que es medida mediante un termopar tipo K.

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = 0 \quad [11]$$

$$T|_{x=L_1} = T_r \quad [12]$$

Reemplazando las condiciones de contorno en la solución general de [10] se obtiene:

$$T_r = T_{amb} + (T_m - T_{amb})(e^{mL_1} + e^{-mL_1}) \quad [13]$$

Siendo:

$$m = \sqrt{\frac{4h}{kD}} \quad [14]$$

Existen dos tipos de coeficientes de convección para el Aluminio. Por una parte, la convección laminar y por otra, la convección turbulenta. A continuación se presentan sus respectivas fórmulas teóricas para hallar dicho coeficiente de convección en un

tubo o cilindro horizontal:

$$h_L = 1,18 \sqrt[4]{\frac{T_p - T_{amb}}{D}} \quad [15]$$

$$h_T = 1,65 \sqrt[3]{T_p - T_{amb}} \quad [16]$$

Para determinar qué tipo de régimen existe en el modelo práctico, se hará una comparativa entre ambos para poder determinar cuál es el que afecta a dicho modelo.

3.4 Modelo de flujo de calor aplicado a una placa.

En la siguiente imagen se muestra el conjunto del tercer modelo diseñado (Ver apartado 4.2) donde se puede observar como la lámina de acero presenta contiguamente una lámina de baquelita para lograr la máxima aislación térmica posible.

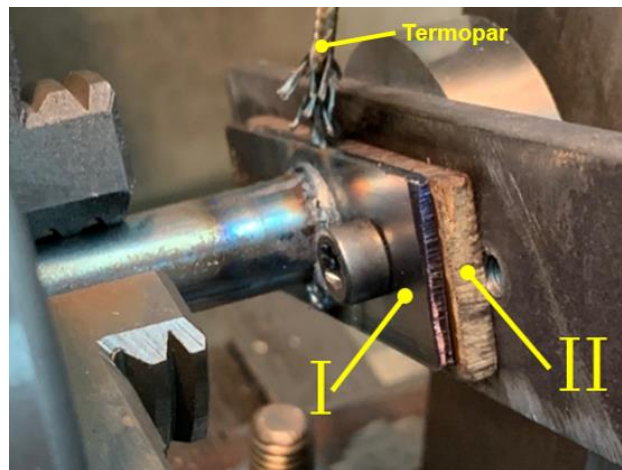


Figura 24: Detalle del conjunto lámina-baquelita. [Autor]

Los espesores correspondientes a dichas piezas son 3mm y 4mm respectivamente, por lo que la figura anterior puede representarse en un dibujo más esquemático:

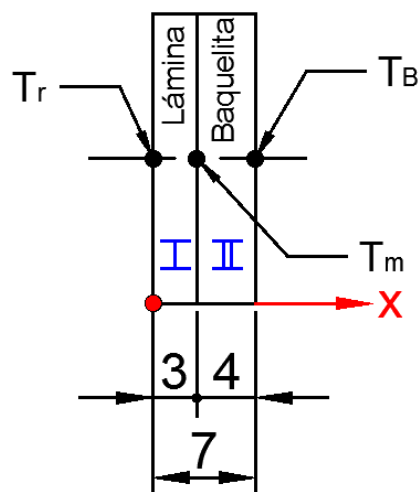


Figura 25: Representación esquemática del conjunto lámina-baquelita. [Autor]

Se puede apreciar en la imagen anterior las piezas I y II que corresponden a la lámina de acero y a la baquelita respectivamente.

Siendo T_r la temperatura medida en la cara de rozamiento, T_m la temperatura leída mediante el termopar, T_B la temperatura de la baquelita y siendo K_A y K_B las conductividades térmicas a 400°C del acero S235 y la baquelita respectivamente, pueden extraerse las siguientes ecuaciones de difusión de calor:

- Para I:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = 0 \quad [17]$$

Siendo las condiciones de contorno:

$$T_{x=0} = T_r \quad [18]$$

$$T_{x=0,003} = T_m \quad [19]$$

$$k_A = 42 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \quad [20]$$

- Para II:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = 0 \quad [21]$$

Siendo las condiciones de contorno:

$$T_{x=0,003} = T_m \quad [22]$$

$$T_{x=0,007} = T_B \quad [23]$$

$$k_B = 1,4 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \quad [24]$$

Mediante la integración de las ecuaciones de la difusión de calor se obtiene la solución general de flujo de calor unidimensional en una placa.

$$T = Ax + B \quad [25]$$

Aplicando la fórmula anterior para los casos específicos anteriores y aplicando las condiciones de contorno, se obtiene:

- Para I:

$$T = \frac{T_m - T_r}{0,003} \cdot x + T_r \quad [26]$$

- Para II:

$$T = \frac{T_B - T_m}{0,004} \cdot x + \frac{7}{4}T_m - \frac{3}{4}T_B \quad [27]$$

Suponiendo que no existe pérdida de calor entre las piezas y siendo la sección perpendicular al flujo de calor la misma para ambas piezas, se aplica la Ley de la conducción de calor de Fourier:

$$q = k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad [28]$$

Se obtiene:

$$k_A \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0,003} = k_B \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0,004} \quad [29]$$

Integrando respecto x las ecuaciones de temperatura obtenidas anteriormente, resulta:

$$k_A \frac{T_m - T_r}{0,003} = k_B \frac{T_B - T_m}{0,004} \quad [30]$$

Aislado de la ecuación anterior T_m se obtiene:

$$T_m = \frac{\left(T_r \frac{k_A}{0,003} + T_B \frac{k_B}{0,004} \right)}{\left(\frac{k_A}{0,003} + \frac{k_B}{0,004} \right)} \quad [31]$$

Sustituyendo los valores de las constantes de conductividad térmica de cada material, se obtiene la ecuación siguiente:

$$T_m = 0,975T_r + 0,024T_B \quad [32]$$

Como se puede apreciar en la ecuación anterior, prácticamente el 98% de la temperatura que es leída por el termopar corresponde a la existente en la cara de rozamiento, siendo esta, levemente mayor a la temperatura leída.

En el supuesto caso que la temperatura leída fuera 600°C, la temperatura real serían 612°C.

Debido a que el error es muy pequeño, se considerará que la temperatura leída mediante el termopar corresponderá a la zona de rozamiento.

3.5 Modelo de la deformación plástica.

Considerando y centrando el estudio en la deformación de una barra esbelta cargada de forma axial, de sección y propiedades constante, podemos apreciar en las figuras 26 y 27, la deformación que se produce en dicha barra debido a una fuerza aplicada de valor F .

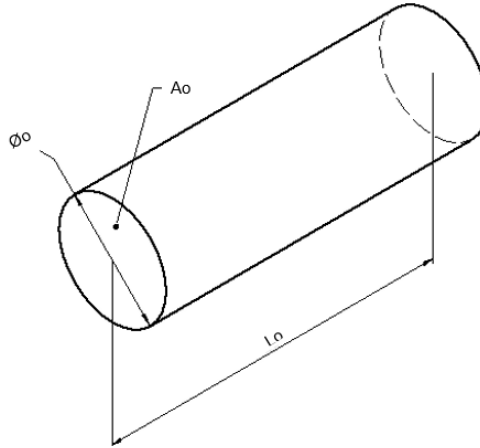


Figura 26: Representación esquemática de la barra sin una fuerza aplicada. [Autor]

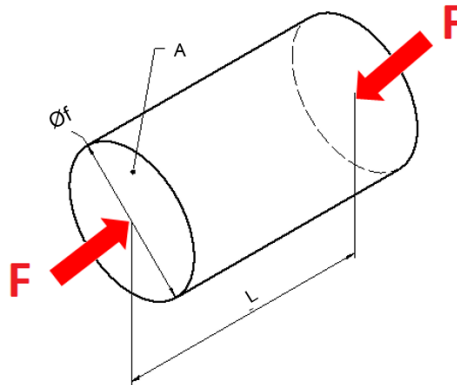


Figura 27: Representación de la barra cuando es aplicada una fuerza de valor F . [Autor]

Teniendo en cuenta que durante la deformación plástica del material no se produce un cambio de masa, se plantea la siguiente ecuación de conservación de la masa:

$$\rho \cdot A_0 \cdot L_0 = \rho \cdot A \cdot L \quad [33]$$

Asumiendo que la densidad del material es constante durante todo el proceso y, derivando y dividiendo [32] por el volumen, resulta la siguiente ecuación:

$$\frac{dA}{A} + \frac{dL}{L} = 0 \quad [34]$$

Se obtiene finalmente la expresión que rige el problema de la deformación plástica en un estado unidimensional.

En pequeñas deformaciones o infinitesimales, la deformación de la barra puede expresarse como:

$$d\varepsilon = \frac{dL}{L} \quad [35]$$

Por otra parte, para grandes deformaciones, se puede considerar que se trata de un proceso uniformemente continuo. Por tanto, la deformación de este, se entiende como la suma indiscreta de todas las deformaciones ocurridas durante el proceso. Dicha suma se considera como una integral, cuyos límites son la longitud inicial y final de la barra.

$$\varepsilon = \int_{L_0}^{L_0 - \Delta L} d\varepsilon \quad [36]$$

Reemplazando [35] en la ecuación anterior e integrando se obtiene:

$$\varepsilon = \ln \left(1 - \frac{\Delta L}{L_0} \right) \quad [37]$$

Finalmente, substituyendo [34] en la ecuación anterior, se obtiene la deformación producida en el material en dicho proceso:

$$\varepsilon = \ln \left(1 + \frac{\Delta A}{A_0} \right) \quad [38]$$

En la siguiente imagen se puede apreciar el resultado de un tubo unido mediante fricción rotativa. Cabe destacar que en dicha imagen se representa únicamente la muestra sin tener en cuenta la pieza adyacente soldada, para la mayor interpretación del esquema. El resultado de este proceso genera una serie de valores, acotados en la imagen que permitirán calcular los valores ΔA y A_0 de la ecuación [38].

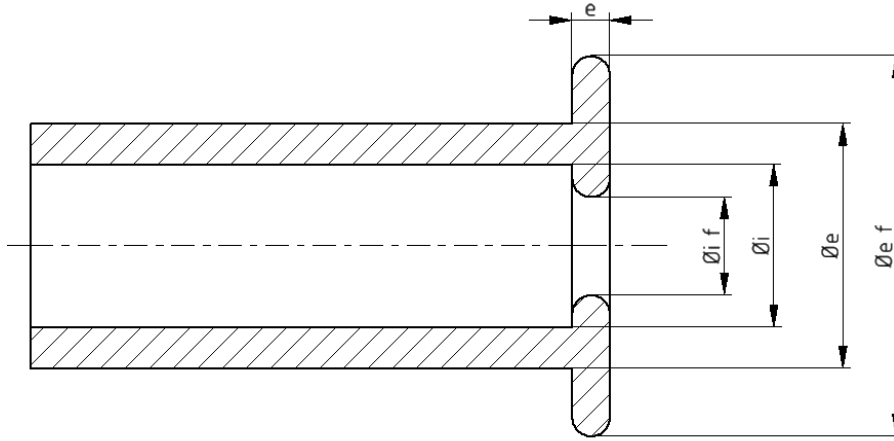


Figura 28: Representación esquemática del resultado de la muestra. [Autor]

Siendo “ \varnothing_i ” y “ \varnothing_e ” los diámetros interior y exterior iniciales respectivamente del tubo, “ e ” el recalcado producido y “ \varnothing_{if} ” y “ \varnothing_{ef} ” los diámetros interior y exterior finales respectivamente generados tras el proceso, se calcula la diferencia de sección (ΔA) como:

$$\Delta A = A_f - A_0 = \frac{\pi}{4} [(\varnothing_{ef}^2 - \varnothing_{ei}^2) - (\varnothing_e^2 - \varnothing_i^2)] \quad [39]$$

3.6 Ley Constitutiva del material

Mediante la ecuación constitutiva del material de Johnson-Cook se puede añadir a dicho proceso el endurecimiento por deformación debido al efecto térmico. Esta ecuación resulta del producto de tres grandes factores. El primero de ellos, el coeficiente térmico debido al endurecimiento, donde A y B son valores propios de tensión del material. El segundo de ellos, la tasa de velocidad de deformación y por último, el tercer término que relaciona los gradientes de temperatura que se producen tanto en el material, como en el entorno que le afecta.

$$\sigma_y = (A + B \cdot \varepsilon^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln\left(\frac{\varepsilon'_p}{\varepsilon'_o}\right)\right) \cdot \left(1 - \frac{T - T_{amb}}{T_f - T_{amb}}\right)^m \quad [40]$$

Reemplazando el valor de la deformación por [36] se obtiene la siguiente ecuación:

$$\sigma_y = \left(A + B \cdot \ln\left(1 + \frac{dA}{A_o}\right)^n\right) \cdot \left(1 + C \cdot \ln\left(\frac{\varepsilon'_p}{\varepsilon'_o}\right)\right) \cdot \left(1 - \frac{T - T_{amb}}{T_f - T_{amb}}\right)^m \quad [41]$$

En la siguiente imagen se puede apreciar la distribución de velocidad en la zona deformada. Debido a que es una sección de bajo espesor, los gradientes de velocidad que se generan son muy pequeños.

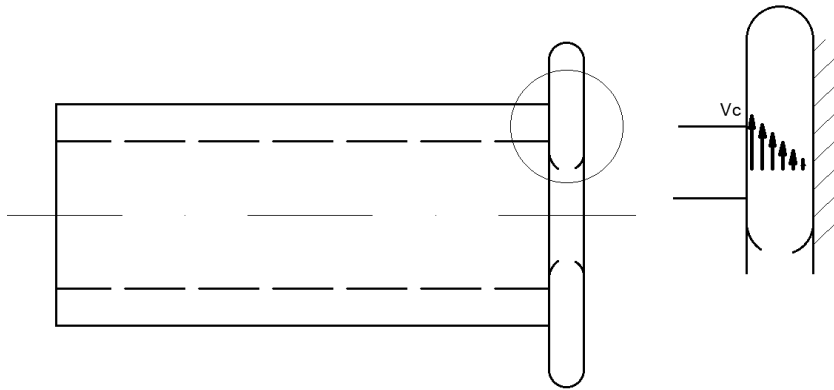


Figura 29: Representación esquemática del gradiente de velocidad generado. [Autor]

Por lo tanto, se considera que no existe plasticidad en el material y por ello, el sistema es considerado cuasiestático. De esta manera, el término central de la ecuación citada anteriormente es anulado quedando finalmente la siguiente ecuación para el cálculo de la tensión de fluencia del material:

$$\sigma_y = \left(A + B \cdot \ln\left(1 + \frac{dA}{A_o}\right)^n\right) \cdot \left(1 - \frac{T - T_{amb}}{T_f - T_{amb}}\right)^m \quad [42]$$

4. DISEÑO DE LOS UTILAJES DE SOLDADURA

Para realizar los ensayos y generar piezas unidas mediante fricción rotativa se utilizará un torno convencional que estará localizado en el laboratorio de la Escuela Politécnica Superior de Vilanova i la Geltrú (EPSEVG). Debido a que no es una máquina diseñada explícitamente para realizar este tipo de soldadura, será necesario el diseño de unos utillajes para poder realizar este proceso.

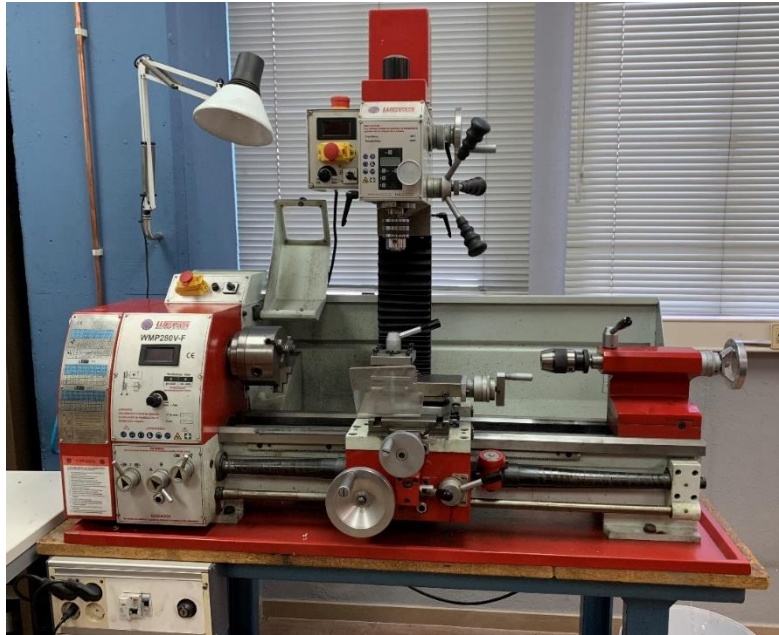


Figura 30: Torno convencional donde se realizan los ensayos [Autor]

Primeramente se desea corroborar si este método de unión es posible realizarlo con la potencia que ofrece el torno. Por ello, se realiza una serie de pruebas enfrentando dos ejes macizos de aluminio comercial. Uno de ellos, sujeto a las garras del torno y el otro, al portabrocas.



Figura 31: Dos ejes de aluminio Ø10 soldados mediante fricción rotativa [Autor]

Como se puede apreciar en la imagen anterior, el proceso puede realizarse en dicho torno y por ello, se plantea un segundo ensayo. Se desea conocer si se produce la unión de un eje de aluminio comercial de 10 mm de diámetro con una lámina de aluminio comercial de 2 milímetros de espesor.

4.1. Primer modelo.

Para ello, se requiere realizar un útil para poder fijar dicha lámina y mediante el avance del torno provocar la unión. Es por ello que se requiere la construcción de las piezas con plano PL_00_01 y PL_00_02 [Ver anexo 2 para el detalle de planos y anexo 3 para ver las hojas de ruta]. Además es necesaria la adquisición de un cono morse tipo MT-2 comercial, que proporcionará la sujeción necesaria para unir el conjunto al carro del torno y un muelle de matricería, que se rige por la norma ISO 10243, diseñado para capacidades de carga intermedias.

Para lograr un ajuste adecuado entre las dos piezas comentadas anteriormente, se recurre al cálculo de tolerancias dimensionales para establecer un juego con deslizamiento fino. Para ver el cálculo de dichas tolerancias ver Anexo 1.



Figura 32: Ensamblaje CAD de las piezas para la unión eje-pletina. [Autor]

En la imagen anterior puede verse reflejado el conjunto de este primer utillaje, donde el eje macizo es sujeto a las garras del torno y la lámina sujeta a la pieza con plano PL_00_01 mediante dos tornillos de métrica cinco. Esta última, irá conectada mediante el muelle comentado anteriormente a la pieza PL_00_02 y esta a su vez, al cabezal móvil. Mediante el avance de este último, se desea comprimir el muelle, transmitiendo este empuje a la lámina que estará en contacto con el eje y a su fin, lograr la unión.



Figura 33: Unión eje-pletina de aluminio. [Autor]

En la imagen anterior puede apreciarse el resultado de esta unión, donde la velocidad del torno es conocida, 700 rpm, pero se desconoce la temperatura que alcanzó el material.

Por ello, el utillaje requería modificaciones para poder operar con mayor precisión y a su vez, poder controlar sus variables.

Durante la ejecución del proceso pudo apreciarse que la rigidez del muelle elegido era inferior a la deseada debido a que la fuerza aplicada hacía permanecer el muelle en total compresión, desconociendo por tanto, la fuerza aplicada sobre la pieza.

Además, el calor generado por la fricción entre el eje y la lámina de aluminio era disipada por la pieza adyacente y retardaba la acumulación de calor y por ello, el proceso de recalado. Como consecuencia de estos motivos, se superó en algún caso la temperatura límite del material, produciéndose una plasticidad del mismo, y como consecuencia, la no unión entre las piezas.

Por ello, fue necesario solventar dichos factores y se hicieron varias propuestas:

Primeramente, fue necesario adquirir un muelle de matricería más rígido que pudiera absorber más fuerza. Por otra parte, y debido que el calor generado era imprescindible para que el material llegara a la unión, fue necesario instalar un aislante térmico entre la pletina y su pieza contigua para evitar la pérdida de calor en el sistema.

Por último, fue necesario instalar un termopar para poder controlar la temperatura en la pieza y no llegar a la plasticidad del mismo.

4.1. Segundo modelo.

En este segundo ensayo fueron implementadas las mejoras propuestas en el apartado anterior. Fue obtenido un muelle de matricería más rígido, obtenido el portal web www.muellestock.com con referencia 700148. Además, se fueron construidas dos piezas aislantes de fibra de vidrio con plano PL_00_03 y PL_00_04 [Ver Anexo 2 para ver planos de construcción y Anexo 3 para hojas de ruta] que proporcionaron al ensayo una mayor retención de calor, provocando la unión con mayor facilidad.

Como se puede apreciar en la siguiente imagen, una de ellas, fue adaptada para la introducción del termopar, para conocer en todo instante el calor producido en la lámina.

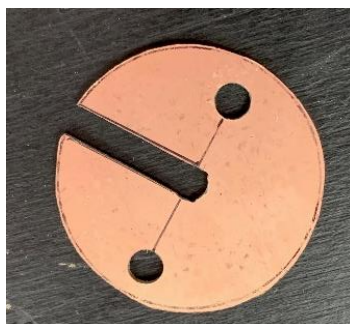


Figura 34: Pieza aislante con ranura. (Plano PL_01_03).[Autor]

Por lo tanto, el conjunto sufrió alguna modificación. Fue substituido el muelle usado como primera opción y fueron añadidas dichas piezas aislantes, además de un termopar. Puede verse reflejado en la siguiente figura:



Figura 35: Ensamblaje CAD de las piezas para la unión eje-pletina. [Autor]

Estas modificaciones pueden verse reflejadas en las siguientes imágenes reales del proceso, donde se aprecia claramente la lectura del termopar y la velocidad del torno.



Figura 36: Imagen del proceso de unión eje-pletina. [Autor]

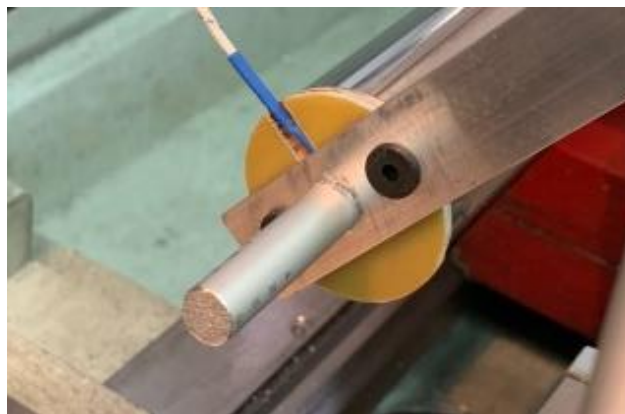


Figura 37: Localización de la medida del termopar. [Autor]

En esta última, se muestra el detalle de la localización exacta donde es medida la temperatura mediante el termopar.

Como se puede observar en la imagen anterior, el eje de aluminio es unido a la pletina llegando a alcanzar una temperatura de 155 °C.

Una vez se ha realizado este ensayo se obtiene conocimiento sobre unos órdenes de magnitud requeridos para obtener la unión entre piezas. De esta manera, se necesitan preparar varias muestras para la unión con diferentes condiciones para establecer un estudio estadístico y derivar a unas conclusiones.

Para poder generar un alto volumen de muestras, se requiere la construcción de una matriz que permita crear muestras válidas en un período corto de tiempo.

Por ello, a través de una prensa robusta para taladro, un taladro de pedestal y un macho para roscar se construyen las piezas PL_01_01 y PL_01_02, siendo la unión entre ambas la matriz que permite construir las muestras con plano PL_01_03 para realizar los ensayos.



Figura 38: Taladro de pedestal perforando la pieza PL_01_01 sujeta a una mordaza para taladro. [Autor]



Figura 39: Operación de roscado de la pieza PL_01_01. [Autor]

Una vez fueron creadas las piezas mencionadas anteriormente, se dispuso a introducir una pletina de aluminio de longitud 40mm entre ambas y mediante un taladro de pedestal, se realizaron los agujeros centrales de una manera repetitiva para preparar todas las muestras y realizar posteriormente los ensayos.

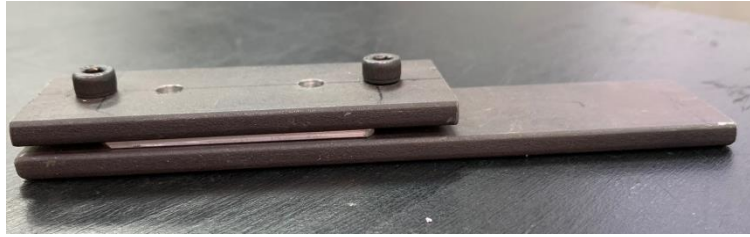


Figura 40: Matriz cerrada previa a la perforación.[Autor]



Figura 41: Matriz abierta con la pieza PL_01_03 perforada.

Una vez se dispuso de todo el alto volumen de muestras para realizar los ensayos, se quiso comprobar cuanto esfuerzo soportaba la unión provocada, por lo que fue necesario realizar un útil para traccionar las piezas en una máquina de tracción proporcionada por la escuela de la EPSEVG.

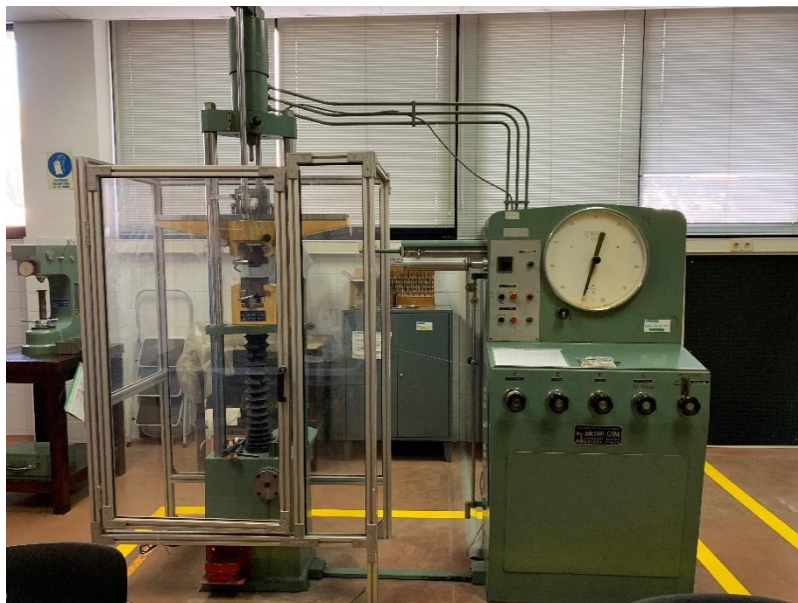


Figura 42: Máquina de tracción donde se realizaron los ensayos a las muestras. [Autor]

Dicho útil fue formado por dos piezas, con planos PL_02_01 y PL_02_02 unidas entre sí por un tornillo DIN 7991 de métrica 5 y 40mm de longitud.



Figura 43: Útil diseñado para la tracción de las muestras obtenidas en los ensayos. [Autor]

Dado que las pruebas de tracción realizadas no fueron buenas debido a que la unión provocada era muy frágil y se rompía con mucha facilidad, se optó por buscar un material alternativo, buscando una unión de mayor calidad y resistencia. Como materiales alternativos fueron escogidos el acero y el acero inoxidable. Este último fue utilizado como lámina, mientras que el primero de ellos fue usado como eje. Dicho eje disponía de una geometría tubular de diámetro exterior 10 milímetros y 1 milímetro de pared.

En cuanto a la metodología de los ensayos, fueron realizados siguiendo el mismo procedimiento anterior. En la tabla que se muestra a continuación se recogen las condiciones establecidas para dichos ensayos, donde también puede verse representado si fue lograda la unión.

T amb (°C)	n (rpm)	T final (°C)	Unión
25	1000	300	NO
25	1000	400	NO
25	1000	510	SÍ

Tabla 1: Condiciones establecidas para el tercer ensayo.[Autor]

De esta manera se volvieron a tener órdenes de magnitud y una temperatura de partida a partir de la cual se producía la unión. El resultado de la prueba fue satisfactoria debido a que se generó una unión homogénea y resistente entre las piezas, como se puede observar en la siguiente imagen:



Figura 44: Tubo de acero unido a una lámina de acero inoxidable [Autor]

En la realización de estas pruebas, se alcanzaron temperaturas que oscilaron entorno a los 650 °C, produciendo un cambio de color notable en las piezas. Este cambio de color de las piezas fue una pieza fundamental en el experimento debido que permitió conocer si los dos materiales llegaron a calentarse por igual.

PROBETA	n (r.p.m)	T° (°C)	Kgf (N)	Observaciones
1	631	210	1922,76	Color homogéneo
2	624	260	470,88	Color NO homogéneo

Tabla 2: Condiciones de los ensayos y su resistencia a la tracción. [Autor]

En la tabla mostrada anteriormente se muestra una comparación entre dos ensayos cuyos resultados obtenidos fueron diferentes. El motivo de este ha sido que en la muestra que menos carga ha soportado no se realizó una etapa de calentamiento (Ver Figura 14). Dicho fenómeno puede verse reflejado de manera más clara en el contraste de dichas probetas en la siguiente imagen:



Figura 45: Resultado de las probetas después de la tracción. [Autor]

De la manera comentada anteriormente, en la probeta de la izquierda se muestra un color homogéneo en la chapa, produciendo una mejor unión entre ambas piezas, viéndose reflejado en las tracciones de las mismas. Mientras que la probeta de la izquierda soporta en su unión 1923N, la probeta de la derecha soportó únicamente 471N. Por este motivo, todos los ensayos dispusieron de una etapa de calentamiento.

En la realización de los ensayos se produjeron en repetidas ocasiones la deformación de las piezas aislantes que estaban en contacto con la lámina debido a las altas temperaturas generadas, como se puede apreciar en la siguiente imagen:



Figura 46: Piezas aislantes deformadas por el efecto térmico. [Autor]

Además, este sistema generaba unas elevadas vibraciones por el juego entre las piezas y el elevado voladizo generado entre el contrapunto. Por este motivo, la vibración afectaba a la acumulación de calor en un punto, dificultando en varios casos, la unión entre piezas. Por estos motivos, fue necesario crear un sistema totalmente diferente, evitando dichas vibraciones y juegos entre piezas.

4.2. Tercer modelo.

El nuevo diseño partió con la premisa de crear un sistema que permitiera fijarse a la bancada para reducir al máximo las vibraciones generadas, además de la creación de un útil con tolerancias dimensionales muy ajustadas. Además, se substituyeron los materiales por hierro comercial, de nomenclatura S235. En la siguiente figura puede observarse este nuevo diseño, dónde la pieza maciza central está unida a un carro del torno y el eje que empuja el muelle recorre por el interior de esta, transmitiendo la fuerza de empuje directamente a la pletina. De esta manera, se redujeron las vibraciones, que fueron absorbidas por la pieza maciza central.

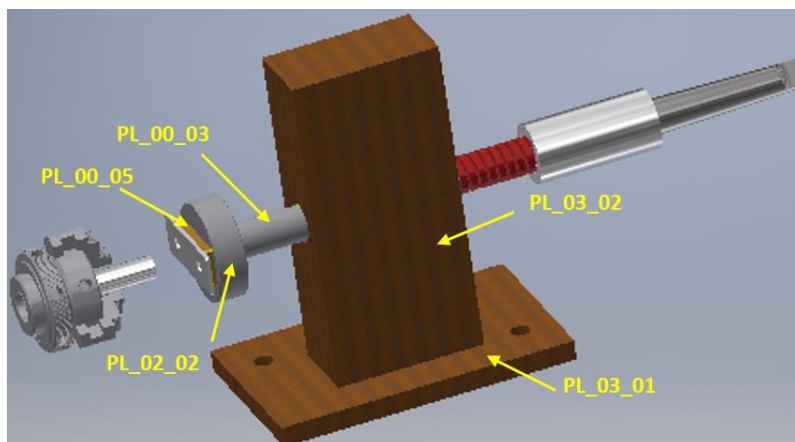


Figura 47: Ensamblaje CAD del tercer modelo. [Autor]

En la siguiente imagen puede apreciarse este ensamblaje de manera real y acoplado al carro del torno:

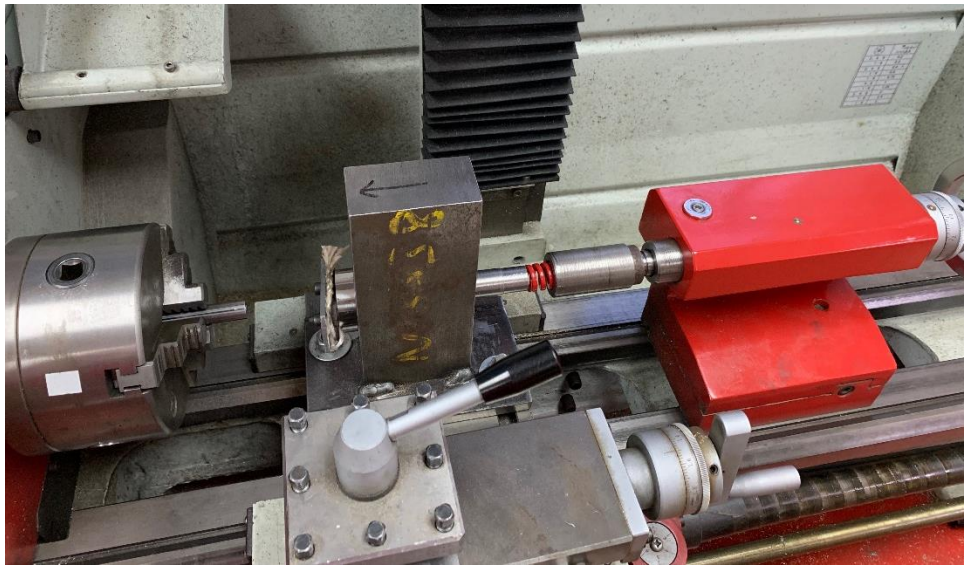


Figura 48: Diseño robusto del tercer modelo [Autor]

Para la elaboración de dicho conjunto se han diseñado las piezas con número de plano PL_03_01, PL_03_02, PL_03_03 y PL_03_04. Entre estas dos últimas, debe existir un ajuste de deslizamiento, mientras que el ajuste entre las piezas PL_03_02 y PL_03_03 debe ser forzado. Para el cálculo de dichas tolerancias ver Anexo 1.

Como alternativa a las piezas aislantes usadas en los ensayos anteriores, se realizó una sustitución del material, siendo el nuevo aislante una placa de 4 milímetros de espesor de baquelita, debido a su elevada resistencia a la temperatura.



Figura 49: Lámina de Baquelita usada como aislante. [Autor]

En la figura anterior se puede observar zonas oscuras debido a la resina que contiene este material en su interior. Tal es la temperatura que se generó que provocó que la resina del interior cediera. Aun así, este nuevo material no cedió y soportó las temperaturas exigidas, certificándolo a través de varias pruebas para ver su comportamiento. Para asegurar aun más su comportamiento, se añadió una cinta aislante tras dicha lámina de baquelita. Esta lámina es usada para la sujeción de tubos

de escape de motocicletas.

Una vez estuvo completado el utillaje se procedió a realizar ensayos con diferentes condiciones. Primeramente, se establecieron 2 variables, que fueron la velocidad de giro del torno y temperatura leída por el termopar. Se fijaron valores numéricos para estas dos variables, para poder así, seguir un criterio.

Como se puede observar en la Tabla 2 del apartado anterior, las piezas se unieron cuando la velocidad de giro del torno superaba las 625 r.p.m. Por este motivo, se establecieron 2 valores de giro para la realización de los ensayos, 625 r.p.m y 1000 r.p.m.

Por otra parte, en referencia a la temperatura, se establecieron unos valores numéricos nuevos debido a que el material aislante ha variado y soportaba mayor temperatura. Por este motivo, y con la experimentación previa de algunas muestras, se determinó que las temperaturas a alcanzar serán de 550°C y 620°C.

El procedimiento para ejecutar estos ensayos fué establecer un avance de 5mm para provocar un rozamiento entre las superficies hasta que estas alcanzaran una temperatura de 500°C. Una vez han logrado alcanzar dicha temperatura, se proporcionaba un segundo avance de 5mm para provocar el recalcado de las piezas y lograr la unión.

En la siguiente tabla se muestran los valores reales de los ensayos realizados junto con su resistencia a la tracción, el valor promedio de las 4 lecturas realizadas para obtener un diámetro interior y exterior medio tras la tracción de las muestras y el espesor del recalcado producido por la combinación de la plasticidad del material y la fuerza proporcionada.

FECHA	n(rpm)	Tª (°C)	Kg tracción	Øext (mm)	Øint (mm)	e (mm)
12-dic	625	560	38	13,6	7,1	1,1
12-dic	640	553	224	13,9	6,3	1,3
13-dic	997	550	176	14,5	6,4	1,3
13-dic	1043	550	108	13,8	7,0	1,2
13-dic	1005	550	-	-	-	-

Tabla 3: Resultados obtenidos en los ensayos realizados con el tercer diseño. [Autor].

Como se puede apreciar la tabla anterior, la última fila carece de datos debido a que las mordazas de la máquina de tracción resbalaron una vez se estaba traccionando la muestra, por lo que no se pudo realizar un segundo ensayo dado que los valores que se obtendrían carecerían de rigor científico.

Además, existe un contraste notable entre los dos primeros experimentos, dado que se realizaron en las mismas condiciones y soportaron cargas muy distintas.

Esto sucede debido a la no colinealidad entre los ejes del tubo y del útil para la tracción. Al existir una desviación entre sus ejes, se crea un momento flector que no permite que la tracción sea pura, por lo que la muestra soporta menos carga.

Como alternativa y solución a esta problemática, se dispuso a rediseñar el útil de tracción para evitar la aparición de dichos momentos flectores, o en su defecto, reducirlos al máximo. De esta manera, los nuevos datos obtenidos en la tracción serán valores numéricos que dotarán al proyecto de consistencia y permitirán establecer unas condiciones sólidas a la hora de determinar las condiciones óptimas de la unión por fricción.

El nuevo diseño del útil de tracción fue formado por un eje roscado semi-rígido que permitió centrar ambos ejes y reducir el momento flector producido durante la tracción. Este nuevo útil es el que se muestra en la siguiente figura:

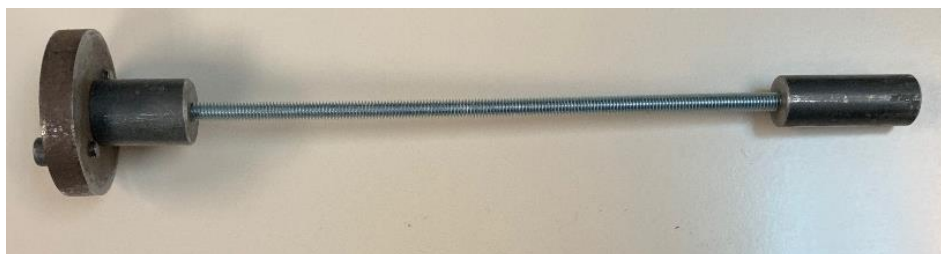


Figura 50: Útil semirrígido de tracción. [Autor]

Los siguientes ensayos que se realizaron con este modelo tuvieron en cuenta un parámetro adicional que permitirá que estos se ejecuten de una manera más controlada y repetitiva. Este parámetro fue el avance, y fue medido mediante 3 lecturas.

Primeramente se taró la manivela del contrapunto a un valor común para todos ellos, que fue a 20 milímetros, donde estarán todas las piezas conectadas mediante un leve contacto. Seguidamente, se aplicó un avance de 5 milímetros hasta llegar a una temperatura de 500°C. Una vez fue leída mediante el termopar la temperatura, se aplicó un segundo avance que facilitó el recalcado de la pieza. Este último avance, fue el parámetro que se varió para poder así poder relacionar este parámetro con los otros ya comentados. Una vez las piezas fueron unidas, se retiró el cabezal del contrapunto hasta volver a la posición inicial, donde fue leída de nuevo la posición, obteniendo un nuevo valor, y por tanto, un diferencial de distancia.

FECHA	n(rpm)	ΔX (mm)	T^a (°C)	Kg tracción	\varnothing_{ext} (mm)	\varnothing_{int} (mm)	e (mm)	ϵ
18-dic	1003	8	700	60	13,5	7,4	0,9	0,71
18-dic	1003	3	550	242	15,8	9,5	2,3	0,93
18-dic	1038	6,75	695	46	13,8	7,0	1,5	0,81
18-dic	1035	6	702	208	15,2	5,2	2,1	1,18

Tabla 4: Resultados de los ensayos realizados con la nueva versión del útil de tracción. [Autor]

En esta última tabla se añade una columna que refleja el valor del incremento de longitud

comentado anteriormente, expresado en milímetros y el valor de la tasa de deformación, calculada según [36]

En relación a los resultados obtenidos pueden verse algunas similitudes entre los comportamientos de las muestras. Es el caso de las filas número 1 y 3 de la tabla anterior donde se aprecia una leve carga soportada. Este valor es directamente relacionado con la última columna, la tasa de deformación, que disponen de unos valores inferiores a 0,9. Este número parece que establezca un límite donde las muestras que superan este valor obtienen unas tracciones de cargas elevadas respecto al resto. Para corroborar este hecho, se realizaron más ensayos siguiendo el mismo procedimiento:

FECHA	n(rpm)	ΔX (mm)	T ^a (°C)	Kg tracción	\varnothing_{ext} (mm)	\varnothing_{int} (mm)	e (mm)	ϵ
21-dic	1036	6,5	703	192	14,0	6,3	1,4	0,91
21-dic	1039	6,75	703	26	13,9	7,3	1,4	0,80
21-dic	1063	4,75	740	176	17,5	7,1	4,6	1,40
21-dic	1086	7,75	820	146	16,0	9,0	2,7	1,02
21-dic	1060	8,75	682	28	13,8	7,0	1,6	0,81
11-ene	1014	8,75	510	26	13,5	7,2	1,1	0,73
11-ene	1012	8,5	620	134	14,1	6,7	1,6	0,90
11-ene	1026	9	591	296	14,1	6,2	1,5	0,93
11-ene	1039	7,5	620	128	14,7	5,6	1,9	1,07

Tabla 5: Resultados de los ensayos realizados con la nueva versión del útil de tracción. [Autor]

En la tabla anterior puede apreciarse de nuevo el fenómeno comentado anteriormente, dónde las muestras reflejadas en las filas 2, 5 y 6 han soportado cargas de 26, 28 y 26 Kg respectivamente, mientras que el resto de muestras superan los 100 Kg.

En cambio, las dos primeras filas muestran los ensayos realizados con las mismas condiciones de velocidad y temperatura alcanzada, mientras que los resultados del esfuerzo soportado son completamente dispares. Debido a que se desconocía por completo el causante de dicha problemática, se decantó por realizar un estudio a pequeña escala de estas dos muestras para poder buscar algún factor que no se hubiera tenido en cuenta.

En la siguiente imagen se muestra el resultado de las muestras una vez han sido traccionadas. En la parte izquierda se encuentra la muestra que más carga a tracción soportó, 192 Kg. En la parte derecha se aprecia la muestra realizada con las mismas condiciones pero que en su defecto, soportó mucha menos carga.



Figura 51: Resultado de las muestras después del ensayo a tracción. [Autor]

Para poder diferenciar entre ambas muestras, se dará la nomenclatura de la velocidad angular a la cual fueron unidas. La muestra de la izquierda se citará como muestra 1036, mientras que la de la derecha se citará como 1039.

A simple vista, se pueden apreciar distinciones entre ambas. Primeramente, en la muestra 1036 se aprecia una zona superior que no dispone de material removido, en cambio, la muestra 1039 sí que la dispone. Debido a que el tubo no se adhirió totalmente a la pletina, como en la muestra 1036, la tracción de la muestra soportó una carga muy reducida. Esta podría ser una explicación a la diferencia entre sus respectivas tracciones.

Además, en la muestra de la 1039 se pueden apreciar zonas oscuras de color marrón que no aparecen en la muestra de la izquierda. Por ello, se precisó a estudiar dichas zonas y observar su superficie.

Para ello, se acudió al departamento de química de la Escuela Politécnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú (EPSEVG) donde pusieron a disposición su material óptico.

Primeramente, mediante un microscopio modelo SMZ800 como el que se puede apreciar en la imagen inferior, se realizaron varias imágenes del posible causante de esta problemática, el óxido formado en el proceso.



Figura 52: Microscopio SMZ800. [Autor]

Gracias a este primer instrumento, se pudieron extraer las siguientes imágenes:

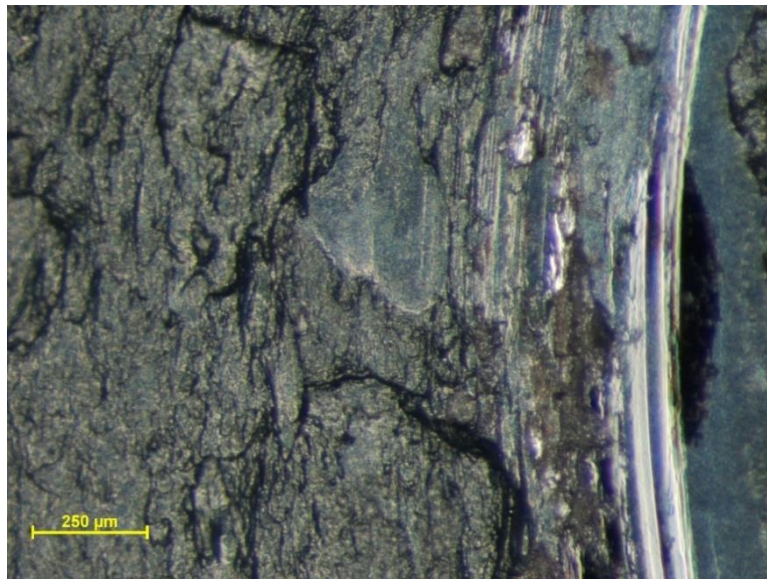


Figura 53: Muestra 1036 observada por el equipo SMZ800.

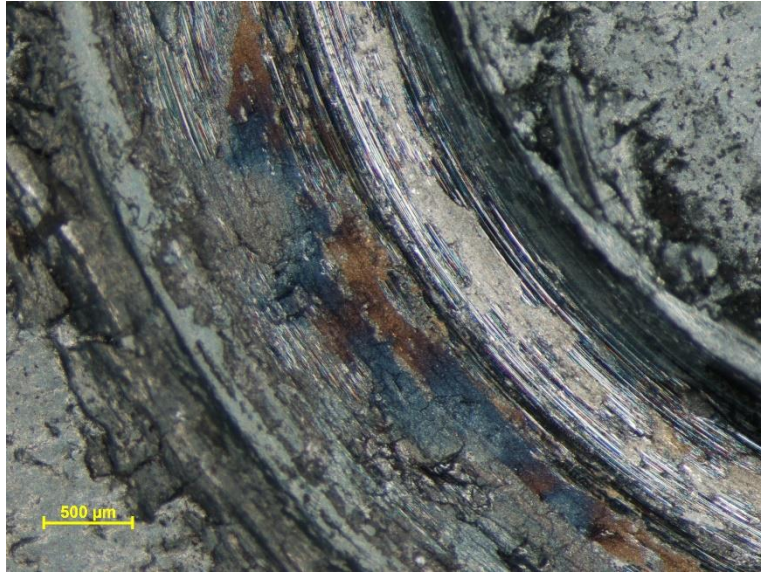


Figura 54: Muestra 1039 observada por el equipo SMZ800.

Como bien puede apreciarse en la imagen anterior, esta dispone de una especie de óxido que aparentemente no se ha formado en la otra muestra. Para observar mejor esta región, se precisó la ayuda de un segundo instrumento óptico, también facilitado por la EPSEVG donde se focalizó el estudio en dichas zonas.

En la siguiente imagen se muestra el microscopio óptico con modelo Eclipse LV100:

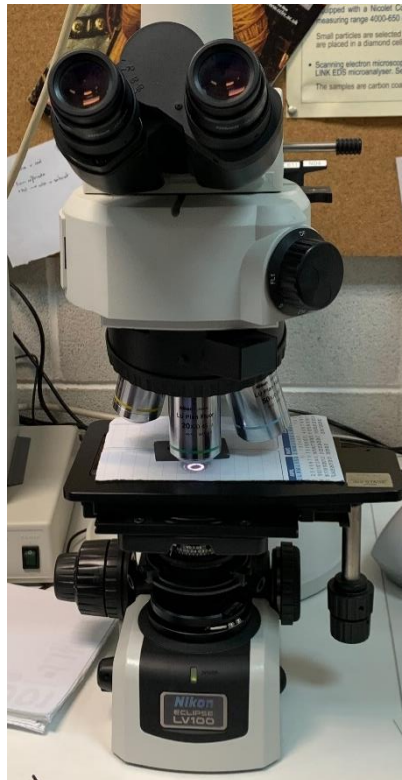


Figura 55: Microscopio óptico modelo Eclipse LV100. [Autor]

Gracias a este instrumento pudieron extraerse las siguientes imágenes con un aumento x100 vistas con una luz polarizada:

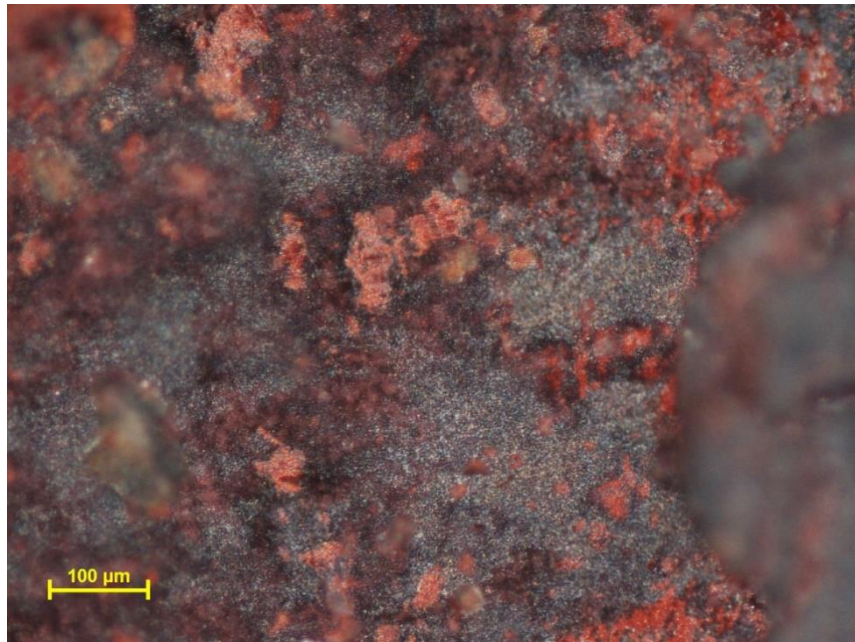


Figura 56: Muestra 1036 vista con luz polarizada.

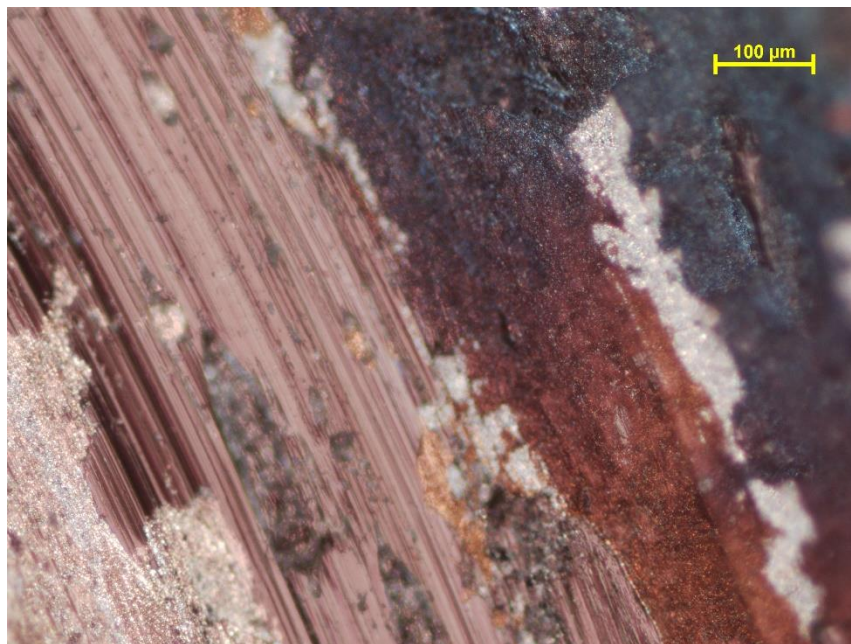


Figura 57: Muestra 1039 vista con luz polarizada.

Como se puede apreciar en ambas figuras, las zonas rojizas correspondían al óxido formado en ellas durante el proceso. Mientras que en la primera se aprecian regiones dispersas de este elemento, en la muestra 1039 aparece de forma general y en mayor abundancia. Se puede decir por tanto, que en la muestra que soportó menos carga se produjo una mayor oxidación respecto la muestra que soportó mayor carga.

Debido a la reacción química generada en las muestras:



Y siendo ambas muestras reproducidas en las mismas condiciones de temperatura, humedad y variables del proceso, se puede relacionar su comportamiento a tracción gracias al siguiente gráfico, donde puede observarse el comportamiento de las propiedades mecánicas en función del porcentaje de oxígeno acumulado en la soldadura.

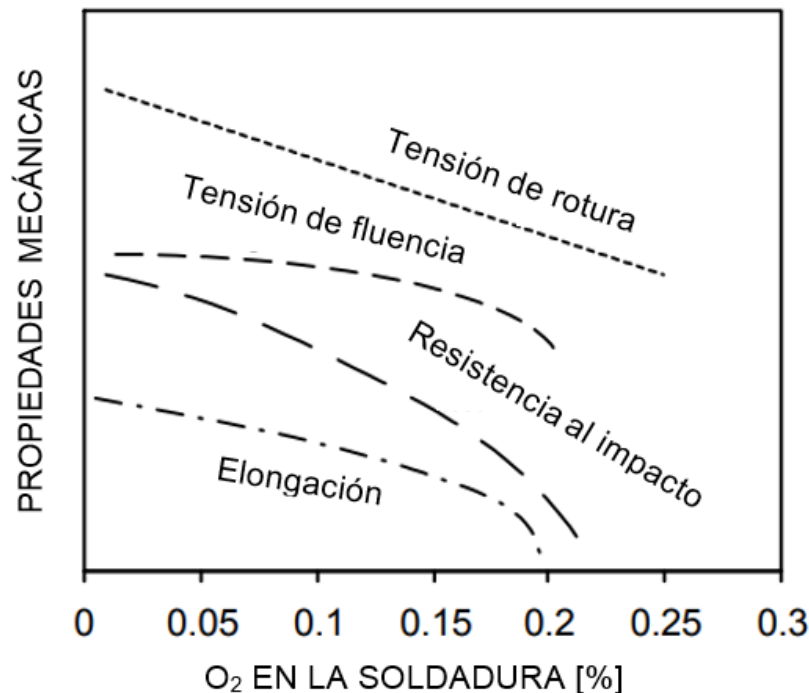


Figura 58: Comportamiento de las propiedades mecánicas en función del oxígeno en la soldadura. [28]

Como se puede observar en la figura anterior, todas las propiedades mecánicas disminuyen en relación al porcentaje de oxígeno, y por ello, de óxido de hierro formado en las muestras. Debido a que la muestra 1039 presentó mayor cantidad de óxido en la superficie de unión se puede concluir argumentando que este óxido es un factor influyente en el proceso de unión.

El motivo por el cual en una muestra se ha producido más óxido que en la otra, es desconocido. En cambio, se puede establecer alguna mejora en el proceso para evitar la formación de óxidos.

Una de ellas sería la adición de nitrógeno de manera constante mientras se realiza la unión debido a que este elemento reduciría la formación de óxidos y además, mejoraría las propiedades mecánicas. Este fenómeno puede apreciarse en la siguiente gráfica donde se aprecia el comportamiento de las propiedades mecánicas en función del nitrógeno existente en la soldadura.

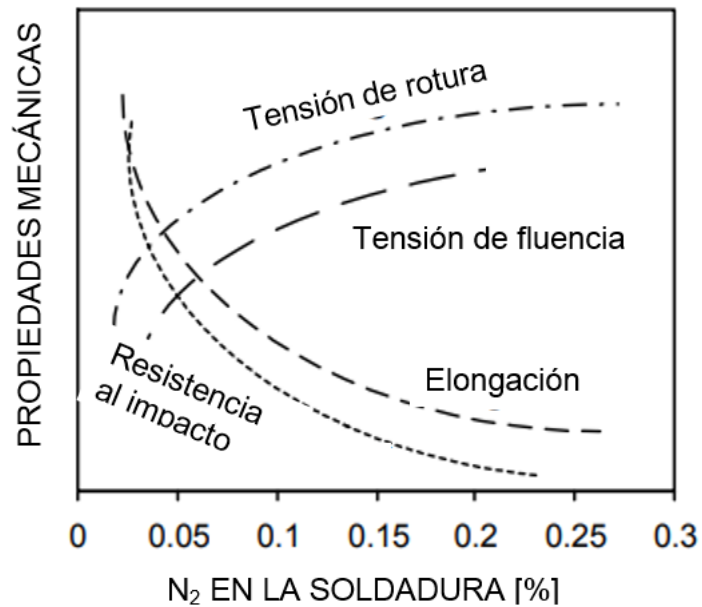


Figura 59: Comportamiento de las propiedades mecánicas en función del nitrógeno en la soldadura. [28]

La adición de este elemento mejoraría la tensión que soportaría la muestra, dotándola de mayor capacidad a resistir esfuerzos, además de otras propiedades. Como propuesta de mejora para futuros ensayos, se recomienda la adición de nitrógeno durante el proceso de soldadura por fricción, para evitar dicha formación de óxidos.

5. PRESUPUESTO

En este apartado se pretende reflejar los costes que se deberían asumir si se desea la reproducción exacta de este proceso. Para ello, se muestra en la siguiente tabla desglosado el coste total, donde se hace diferencia entre la parte de personal y la parte de compra.

TIPO	CONCEPTO	Unidades	€/unidad	TOTAL
MATERIAL	CALIBRADO Ø17X1000 F-1 REDONDO	1	3,10	3,10
MATERIAL	CALIBRADO Ø18X1000 F-1 REDONDO	1	3,37	3,37
MATERIAL	CALIBRADO Ø20X1000 F-1 REDONDO	1	3,93	3,93
MATERIAL	CALIBRADO Ø25X1000 F-1 REDONDO	1	5,58	5,58
MATERIAL	CALIBRADO Ø32x1000 F-1 REDONDO	1	9,87	9,87
MATERIAL	CALIBRADO Ø40X1000 F-1 REDONDO	1	13,16	13,16
MATERIAL	CALIBRADO Ø50X1000 F-1 REDONDO	1	19,54	19,54
MATERIAL	LÁMINA FIBRA VIDRIO 1000X1000X1	1	3,25	3,25
MATERIAL	MUELLE MATRICERÍA ALTA CARGA	6	1,78	10,68
MATERIAL	PASAMANO S235 6000x30x5	1	10,38	10,38
MATERIAL	PASAMANO S235 6000x30x3	1	9,75	9,75
MATERIAL	TUBO S235 6000xØ12x1,5	1	13,45	13,45
MATERIAL	CONO MORSE	1	30,66	30,66
MATERIAL	PLACA 150x100x5	1	10,34	10,34
MATERIAL	MACIZO CUADRADO 80x80x1000	1	88,61	88,61
MATERIAL	TUBO ALUMINIO Ø20x1,5x1000	1	4,04	4,04
MATERIAL	PLACA BAQUELITA 160x100x4	1	5,41	5,41
MATERIAL	TORNILLO DIN 912 M5x30	4	0,02	0,08
MATERIAL	TORNILLO DIN 7991 M530	1	0,05	0,05
HERRAMIENTA	HERRAMIENTA DIN 4972	1	5,51	5,51
HERRAMIENTA	HERRAMIENTA DIN 4974	1	11,00	11,00
HERRAMIENTA	Juego de brocas DIN 338	1	31,38	31,38
HERRAMIENTA	JUEGO LLAVES ALLEN	1	8,99	8,99
HERRAMIENTA	LIMA REDONDA	1	6,96	6,96
HERRAMIENTA	JUEGO MACHOS PARA ROSCAR DIN 371	1	27,9	27,90
MAQUINARIA	TORNO WMP280V-F	1	966,79	966,79
MAQUINARIA	MEDIDOR TEMPERATURA	1	18,59	18,59
MAQUINARIA	TERMOPAR TIPO K	5	1,52	7,60
MAQUINARIA	TALADRO PEDESTAL + MORDAZA	1	89,95	89,95
		Horas	€/hora	TOTAL
PERSONAL	PREPARACIÓN ÚTILES Y PIEZAS	250	10,42	2605,00
PERSONAL	PREPARACIÓN DE MUESTRAS	35	10,42	364,70
PERSONAL	ELABORACIÓN DE MUESTRAS	20	14,35	287,00
			TOTAL	4.676,62 €

Tabla 6: Desglose del presupuesto total del proceso. [Autor]

Considerando la tornillería como material debido a que representa un porcentaje ínfimo respecto el total, se representa el coste total en el siguiente gráfico circular donde se puede apreciar de manera más conjunta el presupuesto:

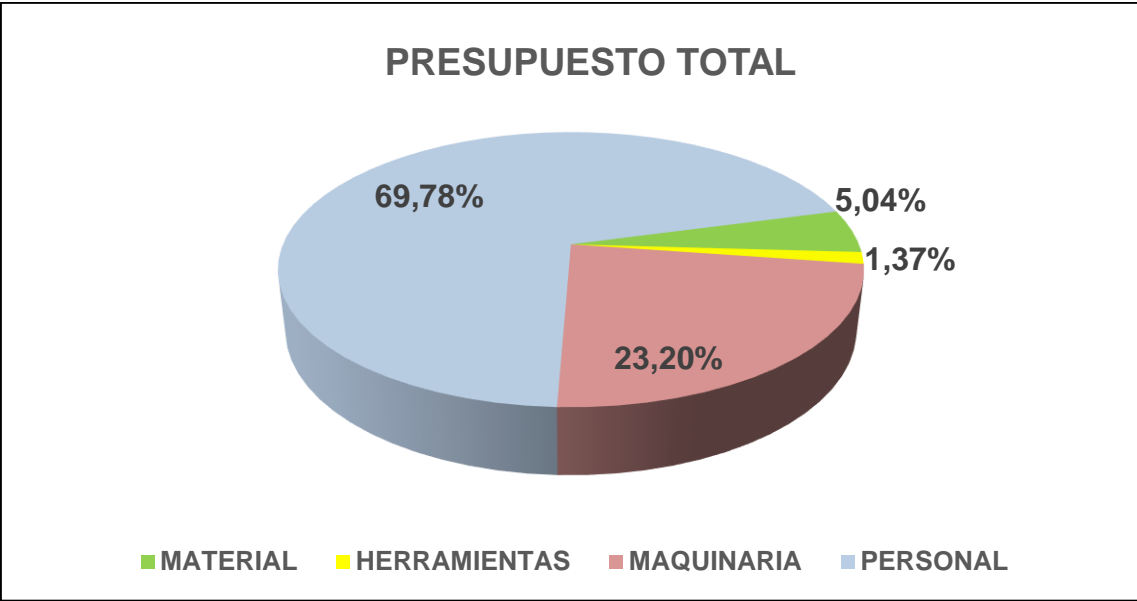


Figura 60: Gráfico sectorial del presupuesto. [Autor]

La inversión requerida para la reproducción del proceso supondría un total de 4.676,62€, donde el mayor porcentaje supondría el montaje y preparación de los útiles y piezas para elaborar la soldadura. Debido a que este proceso se ha desarrollado por parte del estudiante, se elimina el sector personal para analizar más detalladamente el presupuesto. Además, gracias a la EPSEVG que ha facilitado tanto material como maquinaria, se considera nulo el coste de manera que se desea reflejar realmente el coste asumido por parte del alumno.

TIPO	CONCEPTO	Unidades	€/ud	TOTAL
MATERIAL	MUELLE MATRICERÍA ALTA CARGA	6	1,78	10,68
MATERIAL	PASAMANO S235 6000x30x5	1	10,38	10,38
MATERIAL	TUBO S235 6000xØ12x1,5	1	13,45	13,45
MATERIAL	PLACA 150x100x5	1	10,34	10,34
MATERIAL	TORNILLO DIN 912 M5x30	4	0,02	0,08
MATERIAL	TORNILLO DIN 7991 M530	1	0,05	0,05
MAQUINARIA	TERMOPAR TIPO K	5	1,52	7,60
TOTAL				52,58 €

Tabla 7: Coste real asumido por el alumno en la realización del proyecto. [Autor]

Como se puede observar en la tabla anterior, el coste asumido por parte del alumno son 52,58€. Por ello, se realiza de nuevo el gráfico circular para ver reflejado el porcentaje que se ha destinado a cada sector.



Figura 61: Gráfico sectorial del presupuesto real. [Autor]

Como se puede observar en el gráfico anterior, la mayor parte de la inversión se ha destinado a la compra de material para la elaboración de las muestras, mientras que un 14,70% se ha destinado a compras relacionadas con la maquinaria necesaria.

6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Con la ayuda del software G-Numerics se pretende realizar un estudio estadístico de un rango de muestras para ver si estas se comportan siguiendo una distribución normal. Debido a que el número de muestras que se poseen es muy pequeño, se requiere el uso del test Kolmogorov-Smirnov con un intervalo de confianza del 95%. El análisis de muestras se ha realizado con los valores obtenidos en la tracción de las muestras siguientes:

FECHA	n(rpm)	ΔX (mm)	T^a (°C)	Kg tracción	\varnothing_e (mm)	\varnothing_i (mm)	e (mm)	ε
18-dic	1035	6	702	208	15,2	5,2	2,1	1,178
21-dic	1036	6,5	703	192	14,0	6,3	1,4	0,909
21-dic	1063	4,75	740	176	17,5	7,1	4,6	1,401
21-dic	1071	7,25	706	140	13,7	7,3	1,1	0,758
21-dic	1086	7,75	820	146	16,0	9,0	2,7	1,022

Tabla 8: Muestras analizadas para el análisis estadístico. [Autor]

Tras realizar el test de Kolmogorov-Smirnov de los datos de la columna sombreada de la tabla anterior, programa ofreció el siguiente resultado:

Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) Test	Kg tracción
Alpha	0,05
p-Value	0,613
Statistic	0,217
N	5
Conclusion	Possibly normal

Figura 62: Resultado del análisis Kolmogorov-Smirnov. [G-Numerics]

Como se puede observar en la figura anterior, el programa considera el comportamiento normal debido a que la probabilidad extraída (valor 0,613) es mayor a 0,05.

Realizando una estadística descriptiva de los valores comentados anteriormente, el programa exportó los siguientes resultados:

Media	172,4
Error estándar	13,0598621738516
Mediana	176
Desviación estándar	29,2027395975104
Varianza de la muestra	852,8
Curtosis	-2,25641876313409
Desviación	0,00472211472553
Rango	68
Mínimo	140
Máximo	208
Suma	862
Cuenta	5

Figura 63: Resultado del análisis estadístico.

Como se puede observar en la figura anterior, el valor promedio de las muestras corresponde a 176 kg, mientras que los valores mínimo y máximo corresponden a 140 y 208 kg respectivamente.

Por ello, se puede representar la siguiente distribución normal con los datos extraídos en el programa:

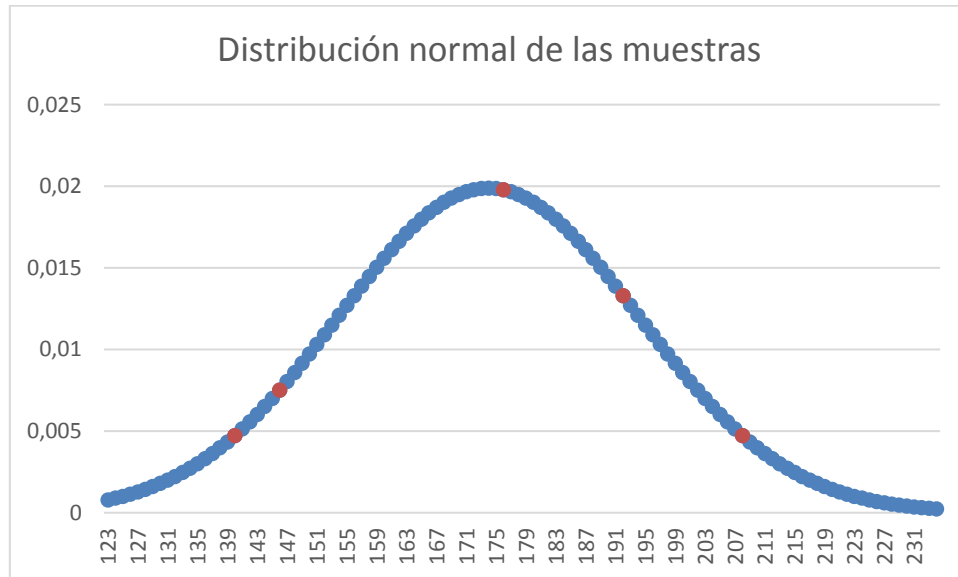


Figura 64: Gráfica de la distribución normal de las muestras.

7. CONCLUSIONES

Tras la realización del proyecto puede concluirse que se han cumplido los objetivos principales del trabajo, los cuales eran diseñar y construir los utillajes necesarios para establecer la soldadura por fricción entre dos materiales acoplado a un torno convencional. Además y gracias a este diseño, se han logrado unir dichas piezas mediante la fricción rotativa entre ambas.

Destacar también la fiabilidad de la medición de temperatura como se ha reflejado apartado 3.4, donde se reafirma que el 98% de la temperatura generada en la cara de rozamiento corresponde a la leída mediante el termopar, por lo que prácticamente la temperatura leída mediante el termopar corresponde a la generada en la cara de rozamiento entre las piezas.

Respecto el análisis de las muestras realizado con un intervalo de confianza del 95% poseen un comportamiento normal, por lo que los resultados obtenidos disponen de una cierta coherencia.

Finalmente, se puede concluir que este proceso de unión es válido para aplicaciones que no requieran elevados esfuerzos. Con las condiciones establecidas en este documento se han logrado uniones que soportan una carga de 1400 N hasta muestras que han alcanzado los 2903 N.

Como propuesta de mejora del proceso realizado en este trabajo, cabe destacar el valor que supone medir la fuerza ejercida en cada momento. Dado que en este proyecto no se ha podido contemplar debido al limitado tiempo, sería una mejora cualitativa implementar una célula de carga en el utillaje para poder controlar la fuerza de recalcado producida y relacionarla con el esfuerzo a tracción.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer al Dr. Hernán González su inmensa aplicación en el proyecto además de su excelente trato, cercanía, disponibilidad y capacidad de transmitir su conocimiento hacia mi persona.

También agradecer a los empleados de mantenimiento de la EPSEVG, Santi y Edu, que han facilitado tareas del proyecto gracias a su colaboración cuando se les ha solicitado.

Agradecer también a los profesores del departamento de Química, Salvador i Nati, que ofrecieron sus conocimientos y herramientas para realizar el estudio óptico de las muestras.

Agradecer también a mi compañero Gerard Vives la experiencia de compartir este tiempo de estancia en la universidad apoyándome y compartiendo siempre buenos momentos.

Finalmente y no por ello menos importante, agradecer a mi familia y a mi pareja Laura la confianza y el apoyo ofrecido en todo este tiempo, dado que sin ellos, esto no hubiera sido posible.

Gracias a todos de corazón,

Daniel Merino Hernández,
Vilanova i la Geltrú, a 28 de Enero de 2018.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Manufacturing Technology, Inc. *Friction Welding*. [En línea] South Bend, Indiana. [Consulta 26 de octubre 2018]. Disponible en:
<https://www.mtiwelding.com/wp-content/uploads/2015/11/mti-friction-welding-technology-brochure.pdf>
- [2] Michael E Nunn, 2005. *LFW Process Schematic*. [Imagen digital]. Queen's University Belfast, Northern Ireland, UK. [Consulta: 31 octubre 2018]. Disponible en:
<https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/linear-friction-welding-146/>
- [3] APCI, LLC, A SUBSIDIARY OF STUPP BROS., INC. *Linear Friction Welding Markets: Extremes and Opportunities*. [En línea] Seattle, WA, USA, 17 Septiembre 2014. [Consulta 31 octubre de 2018]. Disponible en:
<https://ewi.org/eto/wp-content/uploads/2014/10/01-Hinds-APCI-Final-Version.pdf>
- [4] Hiroshi Kuroki, 2014. *Schematic view of blisk manufacturing by LFW*. [Imagen digital] [Consulta: 31 octubre 2018]. Disponible en:
https://www.ihl.co.jp/var/ezwebin_site/storage/original/application/1e3061311e105b0f3f2e0102ca54c7cc.pdf
- [5] Michael E Nunn, 2005. *Welded blisk*. [Fotografía]. Queen's University Belfast, Northern Ireland, UK. [Consulta: 31 octubre 2018]. Disponible en:
<https://www.twi-global.com/capabilities/joining-technologies/friction-welding/linear-friction-welding/>
- [6] Jerry Gould, 2012. *Application of Translational Friction Welding for Rail Assembly and Repair*. [Imagen digital]. Chicago, IL. [Consulta 31 octubre 2018], Disponible en:
https://www.arena.org/files/library/2012_Conference_Proceedings/Application_of_Translational_Friction_Welding_for_Rail_Assembly_and_Repair.pdf
- [7] KUKA, Technology Linear friction welding. [Fotografía]. West Midlands, UK [Consulta 17 diciembre 2018]. Disponible en:
<https://www.kuka.com/en-de/technologies/process-technologies/2016/07/linear-friction-welding>
- [8] Manufacturing Technology, Inc. *Joint Geometries*. [Imagen digital]. South Bend, USA. [Consulta 17 diciembre 2018]. Disponible en:
<https://www.mtiwelding.com/technologies/linear-friction-welding/>
- [9] Anthony R. McAndrew, *A literature review of Ti-6Al-4V linear friction welding*, Cranfield University, UK. [En línea] Octubre 2017. [Consulta 17 diciembre 2018]. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642517301275>
- [10] S.Pereyra. *Modelado numérico del proceso de soldadura FSW incorporando una técnica de estimación de parámetros*. Buenos Aires, Argentina [En línea] Octubre 2013. [Consulta 31 octubre 2018]. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0213131513000485>
- [11] University West. *Lighter cars with new robotic welding method*. [Fotografía]. 2014, University West. [Consulta 10 noviembre 2018]. Disponible en:
<https://phys.org/news/2014-06-lighter-cars-robotic-welding-method.html>
- [12] Akshansh Mishra. *Analysis of Tools used in Friction Stir Welding process* [En línea] Agosto 2006. [Consulta 1 noviembre 2018] Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/325412853_Analysis_of_Tools_used_in_Friction_Stir_Welding_process

- [13] Wayne M Thomas. *FSW basic variants for Whorl™ type tool*. Abington, Cambridge, Reino Unido. Abril 1998 [Imagen digital] Presented at INALCO '98, 7th International Conference on Joints in Aluminum. [Consulta 1 noviembre 2018]. Disponible en: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/friction-stir-welding-and-related-friction-process-characteristics-april-1998/>
- [14] Stephan W. Kallee, *Industrialisation of friction stir welding for aerospace structures*. [En línea] Cambridge, United Kingdom, Diciembre 2001 .Disponible en: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/industrialisation-of-friction-stir-welding-for-aerospace-structures-december-2001/>
- [15] Mitesh Bairwa, Friction Stir Welding (FSW): *Principle, Working, Application, Advantages and Disadvantages*. [En línea]. Haridwar. India. Abril 2017. [Consulta 14 noviembre 2018]. Disponible en: <http://www.mech4study.com/2017/04/friction-stir-welding-principle-working-application-advantages-and-disadvantages.html>
- [16] Manufacturing Technology, Inc., *A COST-EFFECTIVE JOINING SOLUTION FOR THE AUTOMOTIVE INDUSTRY*. [En línea] South Bend, USA [Consulta 15 noviembre 2018]. Disponible en: https://cdn2.hubspot.net/hubfs/612202/spartan-campaign/whitepaper-spartan-direct-drive-friction-welding-machines-MTI.pdf?utm_campaign=Spartan&utm_medium=email&hsenc=p2ANqtz-9s1skGM9g2_fVvRdkCZsF73UXMnG5rPI7SFESp2HxypEEEQzxYFz6L-GQG5cViZ1Jtxu9VVLeLah0pN8JDEoOw0-59Q&hsmi=50973976&utm_content=50973976&utm_source=hs_automation&hsCtaTracking=ba851b9-977f-46e0-b00a-8bc3c9d05199%7C4192ca84-c51c-4610-a883-ad70d66ccd6f
- [17] Manufacturing Technology, Inc. *Joint Geometries*. [Imagen digital]. South Bend, USA. [Consulta 14 noviembre 2018]. Disponible en: <https://www.mtiwelding.com/technologies/rotary-friction-welding/>
- [18] TWI Ltd. *Direct Drive Process Schematic*. [Imagen digital]. Cambridge, United Kingdom. [Consulta 14 noviembre 2018]. Disponible en: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/rotary-friction-welding-148/>
- [19] Manufacturing Technology, Inc. *Rotational Friction Welding*. [Imagen digital]. South Bend, USA [Consulta 14 noviembre 2018]. Disponible en: <https://www.mtiwelding.com/wp-content/uploads/2015/11/rotational-friction-welding-flyer.pdf>
- [20] Izumi Machine Mfg. *Piston rod*. [Imagen digital] Aichi JAPAN. [Consulta 14 noviembre 2018]. Disponible en: http://www.en.izumi-mfg.co.jp/products/dedicated/examples/detail_74.html
- [21] TWI Ltd. *Turbine shaft*. [Imagen digital]. Cambridge, United Kingdom. [Consulta 14 noviembre 2018]. Disponible en: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/rotary-friction-welding-148/>
- [22] Manufacturing Technology, Inc. *Joint Geometries*. South Bend, USA. [Imagen digital]. [Consulta 14 noviembre 2018]. Disponible en: <https://www.mtiwelding.com/technologies/rotary-friction-welding/>
- [23] KUKA, *Rotational friction welding machines*. [En línea]. Augsburg, Germany [Consulta 14 noviembre 2018]. Disponible en: <https://www.kuka.com/en-de/products/production-machines/rotational-friction-welding-machines>
- [24] Manufacturing Technology, Inc. *Rotational Friction Welding*. [Imagen digital]. South Bend, USA [Consulta 14 noviembre 2018]. Disponible en: <https://www.mtiwelding.com/wp-content/uploads/2015/11/rotational-friction-welding-flyer.pdf>

- [25] C Front axle yoke shaft for four-wheel drive vehicles. Manufacturing Technology, Inc. [Imagen digital] South Bend, Indiana. [Consulta 14 enero 2019]. Disponible en:
<https://www.mtiwelding.com/wp-content/uploads/2015/11/mti-friction-welding-technology-brochure.pdf>
- [26] Countersinks. High-speed steel (M2, M42) heads welded to mild-steel (1020) shanks. Manufacturing Technology, Inc. [Imagen digital] South Bend, Indiana. [Consulta 14 enero 2019]. Disponible en:
<https://www.mtiwelding.com/wp-content/uploads/2015/11/mti-friction-welding-technology-brochure.pdf>
- [27] Manufacturing Technology, Inc. *Friction Welding*. [En línea] South Bend, Indiana. [Consulta 14 enero 2019]. Disponible en:
<https://www.mtiwelding.com/wp-content/uploads/2015/11/mti-friction-welding-technology-brochure.pdf>
- [28] Gandhi, B.K., *Chemical Reactions in weld*. 2013. [En línea] Roorkee, India. [Consulta 15 enero 2018]. Disponible en:
<https://nptel.ac.in/courses/112107090/module8/lecture3/lecture3.pdf>
- [29] Xunta de Galicia. *Tolerancias dimensionales* 2013. [En línea] Galicia, España. [Consulta 12 octubre 2018]. Disponible en:
http://www.edu.xunta.gal/centros/cfrcoruna/aulavirtual2/file.php/186/Tolerancias_Dimensionales_Tablas.pdf
- [30] Oteitza Lizeo Politeknikoa. *Tolerancias normalizadas ISO 2010*. [En línea] Guipúzcoa, España. [Consulta 15 octubre 2018]. Disponible en:
http://egela.oteitzalp.org/pluginfile.php/6320/mod_resource/content/1/tolerancias_dimensionales_2.pdf
- [31] Urrutiko Lanbide Heziketako Institutua. *Condiciones de trabajo para herramientas de corte*. [En línea] País Vasco, España. [Consulta: 5 noviembre 2018]. Disponible en:
https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/PPFM/DPMCM/DPMCM01/es_PPFM_DPMCM01_Contenidos/website_34_herramientas.html

ANEXOS

ANEXO I: JUSTIFICACIÓN DE CÁLCULOS

ANEXO II: PLANOS

ANEXO III: HOJAS DE RUTA

ANEXO IV: TABLAS